Reinhard Breuer
Chefredakteur

Dreihundertmal »Spektrum«

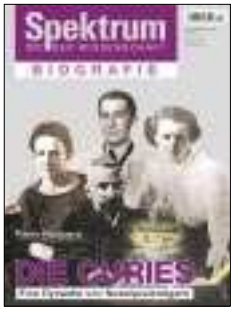
Die Spektrum-Ausgabe, die Sie in der Hand halten, ist das dreihundert-und-erste Heft dieser Monatszeitschrift. Vor 25 Jahren erschien zuerst eine »Nullnummer« ohne Datumsangabe, danach startete das Heft im November 1978 den Monatstakt – bis heute. Unser Jubiläumsjahr feierten wir mit einigen Aktionen: der Artikelserie »25 Jahre Spektrum«, in der wir für ausgewählte Wissensgebiete das letzte Vierteljahrhundert Revue passieren ließen – diesmal mit »Immunologie«, und im Dezember zum Abschluss mit »Kosmologie«. Im Sonderteil »Innovation in Deutschland« des vorliegenden Hefts beleuchten wir den Zustand technologischer Kreativität in unserem Land. Und schließlich als leichte Muse: das Preisrätsel. Sein dritter Teil in diesem Heft könnte Ihnen sogar eine Reise nach New York und einen Besuch bei Scientific American bescheren! (Seite 100)

Wie sehen wir uns im Verhältnis zu Ihnen? Wir machen das Magazin ausschließlich für unsere Leser – und befragen Sie deshalb seit über vier Jahren jeden Monat, was Sie an der jeweils aktuellen Spektrum-Ausgabe im Detail gut oder schlecht finden. Es sind auch Ihre Wünsche, die das Magazin prägen. Unter anderem haben wir daraus gelernt, dass Sie Chemie, Mathematik und Computer am wenigsten mögen, Astronomie/Kosmologie, Physik, Archäologie und Biowissenschaften dagegen am liebsten. Bei den Rubriken rangieren »Forschung Aktuell«, das »Spektrogramm« und das »Bild des Monats« in der Hitliste ganz oben.

Wie hat sich unser Magazin dadurch verändert? Einmal ist Spektrum – als deutsche Ausgabe von Scientific American – in den letzten Jahren eigenständiger geworden: Rund sechzig Prozent aller Themen und Autoren entstammen heute deutschen Forschungsinstituten. Zum anderen haben wir versucht, Spektrum noch mehr Profil und Aktualität zu geben. Das begann mit der Einführung von Kommentaren (»Nachgehakt«) und führte uns auch zu leichteren Elementen wie Glossen (»Am Rande«) oder Cartoons. Gerade die manchmal amüsanten, manchmal auch sarkastischen Strichzeichnungen von »OH«, dem österreichischen Psychologieprofessor Oswald Huber von der Universität Fribourg/Schweiz, möchten viele von Ihnen laut Umfrage nicht mehr missen. Auch neue Rubriken wie »Wissenschaft im Alltag« erfreuen sich Ihrer Gunst. Aber andere Kolumnen wie »Ausgezeichnet« haben Sie über ein Negativvotum »abgewählt« oder, wie etwa eine geplante »Schachecke«, gar verhindert.

Neben der Monatsausgabe mit Berichten aus allen Wissenschaftsgebieten erscheinen laufend Sonderhefte zu Einzelthemen, die wir bedeutend finden: zuletzt »Krebsmedizin II«, das »Sexualleben in der Tierwelt« oder ein Porträt der Nobelpreisträger-Familie »Curie«.

Erfreuliche Zuwächse hat die Familie der Spektrum-Zeitschriften in jüngerer Zeit bekommen: Nicht nur erscheint »Sterne und Weltraum« bei uns, ein Astronomie-Monatsheft, das seit langem anspruchsvollere Sternfreunde bedient. Auch unsere neue Zeitschrift »Astronomie Heute« versucht – auf populärere Weise für Amateur- und Lehnstuhlastronomen –, die Geheimnisse des Himmels zu erklären. Schließlich wenden wir uns mit unserem dritten Kind, dem Magazin »Gehirn & Geist« an alle, denen Psychologie und Hirnforschung am Herzen liegen – brisante Forschungsgebiete, die den Rätseln von Bewusstsein, Denken und Kreativität auf der Spur sind. Spektrum bleibt, so hoffen wir, neugierig und wissensdurstig wie Sie, liebe Leser.



Die neuesten Sonderhefte sowie die neuen Zeitschriften von »Spektrum«

INHALT

AVENTIS

BIOTECHNOLOGIE
Insulin der neuen Generation Seite 21

DLR, INSTITUT FÜR ROBOTIK UND MECHATRONIK

MECHATRONIK
Roboter für morgen Seite 26

AUTOMOBIL
Brennstoffzellen auf dem Vormarsch Seite 30

DAIMLERCHRYSLER

Experteninterviews

Hans-Olaf Henkel Seite 16

Jürgen Kluge Seite 24

Claus Weyrich Seite 28

Titelbild: Ag.Focus / Science Photo Library

Robinson Deutschland 6
Forschung und Entwicklung sind die Garanten des Wohlstands. Wie steht es um unsere Zukunft?

Maßgeschneiderte Medizin 10
Neue Tests könnten schon bald die Diagnose von Krankheiten wie Darmkrebs ermöglichen, noch bevor die ersten Symptome auftreten

Schnell, präzise, kraftvoll 14
Reif für die Zukunft: »Piezo-Stacks« revolutionieren den Dieselmotor

INTERVIEW
Insgesamt läuft viel zu wenig 16
Leibniz-Präsident Hans-Olaf Henkel über die Zukunft des Forschungsstandorts Deutschland

Poststelle mit Pfiff 18
Intelligente Software-Agenten lichten das E-Mail-Chaos

KOMMENTAR
Den Wandel gestalten 20
Stiftungen als Vorreiter in Sachen Innovation

24 Stunden über Normalnull 21
Eine neue Medikamentengeneration für Diabetes-Patienten

INTERVIEW
Inspiration durch Kommunikation 24
McKinsey-Chef Jürgen Kluge über Innovation in Industrieunternehmen

Maschinen mit Fingerspitzengefühl 26
Weltweit beliebt: Roboter aus Oberpfaffenhofen

INTERVIEW
Visionen mit System 28
Siemens-Forschungsvorstand Claus Weyrich über cleveres Technologiemanagement

Reif für die Piste 30
Die ersten Brennstoffzellen-Autos sind bereits unter uns

Mikro, Nano, Opto 33
Die Schlüsseltechnologien von heute prägen unser Leben von morgen

Editorial 5 • Impressum 22

EDITORIAL

Carsten Könneker

Knirschen im Hightech-Getriebe

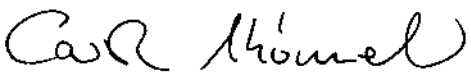
Unsere Gesellschaft kann ihre Wirtschaftskraft weder auf bedeutende Rohölvorkommen noch auf eminente Tourismuseinnahmen gründen. Den allgemeinen Wohlstand sichern Innovationen durch Forschung und Entwicklung (F&E), die das Land wettbewerbsfähig halten. Schlecht also, wenn es hier im Getriebe knirscht. Doch genau das ist der Fall: Im Maschinenraum des »Tankers Deutschland« schrillen die Alarmsirenen – auch wenn Politiker das heikle Thema lieber nicht ansprechen und sich allenfalls in gegenseitigen Schuldzuschreibungen verlieren.

Wer sich für die gegenwärtige technologische Leistungskraft des Landes interessiert, ist gut beraten, die Dinge differenziert zu betrachten. Denn einerseits schaffen hiesige Wissenschaftler und Ingenieure emsig technologische Neuerungen von Weltrang. Andererseits befinden wir uns jedoch mitten in einer gefährlichen Abwärtsbewegung. Einige Fakten: Der Anteil deutscher Unternehmen am Welthandel mit F&E-intensiven Waren ist seit Anfang der 1990er Jahre um rund ein Drittel gesunken. Ingenieurdienstleistungen führen wir mittlerweile mehr ein als aus – wobei ohnehin fast ausschließlich der Automobilsektor signifikante Exportbeiträge leistet; im Hightech-Bereich, bei den Schlüsseltechnologien für morgen, spielt die Musik dagegen meist woanders. Unterm Strich kommt kein Analyst an der Aussage vorbei, dass Deutschland als Spitzenforschungs- und Produktionsstandort immer mehr an Bedeutung verliert.

Die Gründe für diese folgenschwere Entwicklung sind vielschichtig, aber klar zu benennen (siehe die Beiträge ab Seite 6, 16 und 24): hohe bürokratische Hemmschwellen für Existenzgründer, zu wenig Wettbewerb schon an den Hochschulen sowie massive Nachwuchsprobleme in genau jenen Berufsfeldern, deren Leistungsträger unsere Zukunft einmal gestalten und sichern sollen. So hat sich die Zahl der Absolventen in den F&E-relevanten Fächern Physik, Maschinenbau und Elektrotechnik seit 1993 annähernd halbiert – was vor allem mittelständische Unternehmen zu spüren bekommen: Ihnen gehen die Entwickler aus. Hinzu kommen die im internationalen Vergleich sehr hohen Kosten für Forschungsarbeitsplätze und die zu geringen öffentlichen Aufwendungen für die Grundlagenforschung – zu der sich in vielen Bereichen auch noch eine mangelhafte Verzahnung mit der Anwendungsseite gesellt.

Mit anderen Worten: Innovative Köpfe haben es bei uns nicht leicht. Dennoch gibt es sie in Deutschland – und sie schaffen hochkarätige Neuentwicklungen, die international wegweisend sind, so etwa in den Bereichen Biotechnologie (S. 10), Neue Materialien (S. 14), Software-Engineering (S. 18), Robotik (S. 26) und Umwelttechnik (S. 30). Unsere Autoren haben für Sie republikweit in den verschiedensten wissenschaftlichen Disziplinen recherchiert und einige Glanzlichter deutscher Spitzenforschung festgehalten.

Für mich steht damit fest: Um unsere Zukunft nicht aufs Spiel zu setzen, müssen wir die Rahmenbedingungen für Innovation hier zu Lande dringend verbessern. Sobald wir auf diesem Wege vorankommen, können wir von den in Deutschland ausgebildeten Forschern und Entwicklern aber auch Etliches erwarten!



Strafe muss nicht sein

Forschung Aktuell, September 2003

Der Mensch ist ein Lebewesen der Gemeinschaft

Das erkannte bereits Aristoteles. Nur falls der Mensch ein Eigenbrötler wäre, könnte man ein anderes Verhalten erwarten als die geschilderte soziale Fairness. Innerhalb der Gemeinschaft sind einige Verhaltensweisen logisch, die für den Einzelnen nicht vorteilhaft erscheinen.

Als archetypische »Nesthocker« werden wir von klein auf sozial konditioniert. Ein Verhaltenstherapeut kennt die Schwierigkeiten, den Menschen zu einer Veränderung dieser eingeprägten »Konstrukte« zu verhelfen. Es wäre interessant, andere Kulturkreise zum Vergleich heranzuziehen oder das soziale Verhalten gezwungener »Nestflüchter« (Waisen, Vernächlässigte, Flüchtlinge) zu studieren. Ich glaube, dass sämtliche Probleme der heutigen globalen Krisen daran erkennbar werden.

Wenn sich Mitmenschen nicht als Teil der Gesellschaft erkennen, dann kann auch kein Altruismus für das Gemeinwohl entwickelt werden.

Dr. Karsten Löhr, Ulm

Mangelnde Fairness des Partners Schule

Das Ergebnis des Experiments von Ernst Fehr und Bettina Rockenbach findet eine bemerkenswerte Parallele im deutschen Schulsystem. Die hinlänglich bekannte Selektierung unserer Schüler am Ende des 4. Schuljahrs wird von den Betroffenen als sehr harte und unangemessene Sanktion empfunden. Die mangelnde Fairness des Partners Schule führt bei den Schülerinnen und Schülern zu einem »Schmolleffekt«, der zu einer erheblichen Leistungsminderung führt. Wie ineffektiv und wie unökonomisch das deutsche Schulsystem deshalb ist, hat uns die Pisa-Studie unlängst bestätigt. Fehr und Rockenbach sollten ihre Tests kindgerecht aufbereiten und sie an Grundschulen, Haupt- und Realschulen wiederholen.

Hartmut Horn, Hechingen

Paralleluniversen

August 2003

Probleme mit Doppelgängern erörtern

Es mag ja sein, dass der Widerstand gegen Multiversum-Theorien allmählich nachlässt. Angesichts der noch zu lösenden kleinen Probleme dieser Theorien bin ich selbst etwas zurückhaltend und werde mir darüber erst dann eine Meinung bilden, wenn ich die Probleme mit meinen zahlreichen Doppelgängern ausführlich erörtert habe.

Dr. Karl Mistelberger, Erlangen

Wie expandiert Unendliches?

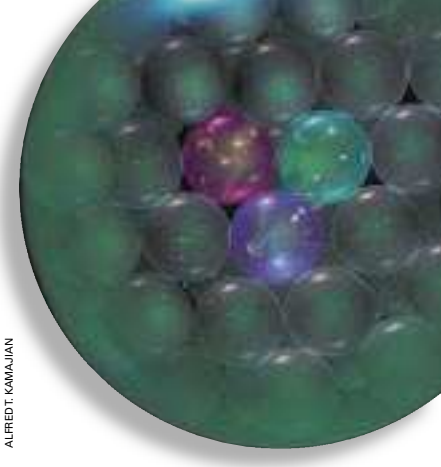
Ich scheitere bereits am »Ebene-I-Multiversum«. Die vom Autor offenbar akzeptierte Urknall-Hypothese lässt meiner Ansicht nach kein unendlich großes Universum zu, da seit dem Urknall nur endlich viel Zeit für die Expansion zur Verfügung stand.

Selbst wenn die »Inflation« es dann auf einen unendlichen Durchmesser aufgebläht haben sollte, bleibt die Frage, wie etwas Unendliches noch weiter expandieren kann.

Dr. Christian Jäkel, Beringstedt

Antwort des Autors:

Der Urknall ereignete sich nicht nur an einem Punkt, sondern überall gleichzeitig, darum brauchte die Materie jenseits unseres Horizonts nicht erst große Entfernungen zurückzulegen, um dorthin zu gelangen.



ALFRED T. KAMAJIAN

▲ **Unser Universum (rote Blase) bildet möglicherweise mit vielen anderen Paralleluniversen ein »Ebene-I-Multiversum«.**

Zuflucht in prinzipiell Unbeobachtbarem gesucht

Tegmark verweigert die Unterscheidung zwischen »möglich« und »wirklich«.

Um die speziellen Eigenschaften unseres Universums zu erklären, betrachtet er jeweils alle anderen Eigenschaften, die stattdessen auch denkbar wären, und sortiert die so definierten Denkmodelle in vier Ebenen unendlichfacher »Multiversen«. Alle darin enthaltenen Einzeluniversen seien gleichermaßen real. Dagegen spricht:

1. Nicht alles Denkbare existiert auch schon.
2. Die »Vogelperspektive« des

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Christina Peiberg, Sigrid Spies
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Natalie Schäfer
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg, Tel. (0 62 21) 91 26-711, Fax (0 62 21) 91 26-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft, Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, D-69126 Heidelberg, Tel. (0 62 21) 91 26-600, Fax (0 62 21) 91 26-751
Geschäftsleitung: Dean Sanderson, Markus Bossle
Büro Bonn: G. Hartmut Altenmüller, Tel. (0 22 44) 43 03, Fax (0 22 44) 63 83, E-Mail: ghalt@aol.com
Korrespondenten: Dieter Beste, Marion Kälke, Tel. (0 21 1) 90 83 57, Fax (0 21 1) 90 83 58, E-Mail: Dieter.Beste@t-online.de
Produktentwicklung: Dr. Carsten Könneker, Tel. (0 62 21) 91 26-770
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. (0 62 21) 91 26-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. (0 62 21) 91 26-741, E-Mail: marketing@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. (0 62 21) 91 26-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Anette Bolz, Hermann Englert, Dr. Rainer Kayser, Dr. Susanne Lipps.

Leser- und Bestellservice: Tel. (0 62 21) 91 26-743, E-Mail: marketing@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft, Boschstraße 12, D-69469 Weinheim, Tel. (0 62 01) 60 61-50, Fax (0 62 01) 60 61-94
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Porto-Mehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konten: Deutsche Bank, Weinheim, 58 36 43 202 (BLZ 670 700 10); Postbank Karlsruhe 13 34 72 759 (BLZ 660 100 75)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Sibylle Roth, Tel. (0 21 1) 887-23 79, Fax (0 21 1) 887-23 99; verantwortlich für Anzeigen: Gerlinde Volk, Postfach 10 26 63, D-40017 Düsseldorf, Tel. (0 21 1) 887-23 76, Fax (0 21 1) 37 49 55
Anzeigenvertretung: Berlin: Dirk Schaeffer, Friedrichstraße 150–152, D-10117 Berlin, Tel. (0 30) 61 68 61 50, Fax (0 30) 6 15 90 05, Telex 114810; Hamburg: Michael Scheible, Burchardstraße 17, D-20095 Hamburg, Tel. (0 40) 30 183/-183/-194, Fax (0 40) 33 90 90; Düsseldorf: Klaus-P. Barth, Werner Beyer, Kasernenstraße 67, D-40213 Düsseldorf, Postfach 10 26 63, D-40017 Düsseldorf, Tel. (0 21 1) 3 01 35-20 60, Fax (0 21 1) 1 33 97 4; Frankfurt: Anette Kullmann, Annelore Hehemann, Eschersheimer Landstraße 50–54, D-60322 Frankfurt am Main, Tel. (0 69) 24 24-45 36, Fax (0 69) 24 24-45 55; Stuttgart: Norbert Niederhof, Königstraße 20, D-70173 Stuttgart, Tel. (0 71 1) 22 47 5-40, Fax (0 71 1) 22 47 5-49; München: Bernd Schwetje, Josephspitalstraße 15, D-80331 München, Tel. (0 89) 54 59 07-14, Fax (0 89) 54 59 07-16
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, D-40213 Düsseldorf, Tel. (0 21 1) 887-23 87, Fax (0 21 1) 37 49 55
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 24 vom 01.01.2003.

Gesamtherstellung: Konradin Druck GmbH, Leinfelden-Echterdingen

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.
Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2003 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.
Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.

Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: Rolf Grisebach, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg

Multiversums verfehlt die Aufgabe der Physik, unser (das empirisch zugängliche) Universum zu beschreiben. Hier wird Abstraktion missverstanden.

3. Bei aller kreativen Fantasie, die die Wissenschaft braucht, ist es ein Unterschied, ob man zur Erklärung nur momentan Unzugängliches, aber doch prinzipiell Beobachtbares postuliert, oder ob man (wie Tegmark) in prinzipiell Unbeobachtbarem Zuflucht sucht. Im einen Fall können brillante theoretische Vorhersagen gelingen, im anderen droht haltlose Metaphysik.

Helmut Fink, Erlangen

Zuerst kam die Feder

Oktober 2003

Es ist klar, dass für die Entwicklung des Vogelfluges mehrere Zwischenschritte notwendig waren, von denen jeder einen evolutionären Vorteil geboten haben muss. Das gilt auch für die Entwicklung der Vogelflügel selbst.

Eine fast 150 Jahre alte Beobachtung illustriert die Tatsache, dass auch Flügel, die zum Fliegen ungeeignet sind, einen evolutionären Vorteil bieten können. Der Architekt Antonio Gaudí (1852–1926) hat diese Beobachtung in seiner Kindheit gemacht. Als einer seiner Lehrer sagte, dass Vögel ihre Flügel zum Fliegen brauchen, wies er darauf hin, dass die Hühner in Nachbars Garten ihre Flügel nicht zum Fliegen benutzen, sondern dazu, schneller zu laufen.

Jörg Michael, Hannover

Der steinige Weg zur Anti-Aging-Pille

Juli 2003

Dieser Artikel hat mich aufgeregt. Hier wird erforscht, was dem modernen Menschen noch fehlte: Die Pille für hemmungsloses Schlemmen ohne Reue. Ist das nicht eine Höchstform von Dekadenz? Wenn wir es nicht schaffen, unsere Kalorienzufuhr selbst auf das notwendige Maß zu beschränken, so bietet uns die Pharmaindustrie demnächst die Lösung – konsumieren bis zum Gehtnichtmehr!

Mein Vorschlag: Jeder spende den Teil X, den er für zu viel Nahrung und Genussmittel ausgibt, direkt der Entwicklungshilfe oder ähnlichen Institutionen. Dadurch können dann neben den im Überfluss Lebenden viele weitere Menschen in Regionen ohne Fettsucht ebenfalls eine Chance auf ein längeres und gesünderes Leben erhalten.

Hartmut Schaub, Berlin

Sehtraining bei Teilblindheit

September 2003

In dem Artikel wird meines Erachtens aufgezeigt, wie Forschungsneid selbst ethische Grenzen überwindet. Da müssen die Autoren sich vorwerfen lassen, trotz eindeutiger Messergebnisse nicht wissenschaftlich gehandelt zu haben, weil Doppelblindversuche fehlen. Diese machen wissenschaftlich aber nur Sinn, wenn Unklarheit über die Vollständigkeit der Rahmenbedingungen besteht oder Letztere schnell wechseln. Herrscht aber einigermaßen Klarheit oder Konstanz, so ist ein Versuchsergebnis für sich alleine bereits aussagekräftig. Nach den Ausführungen der Autoren scheint hier der zweite Fall zuzutreffen.

Nun gehört in einigen Bereichen der Doppelblindversuch zum Standardrepertoire und wird »blind« ausgeführt oder eingefordert. Indem schwer behinderten Menschen zugemutet wird, aus mehr oder weniger pseudowissenschaftlichen Gründen sinnlose Langzeitexperimente über sich ergehen zu lassen, wird meiner Ansicht nach eindeutig ein ethischer Rahmen verlassen.

Prof. Gilbert Brands, Emden

Erratum

Die Alltagsdroge Koffein

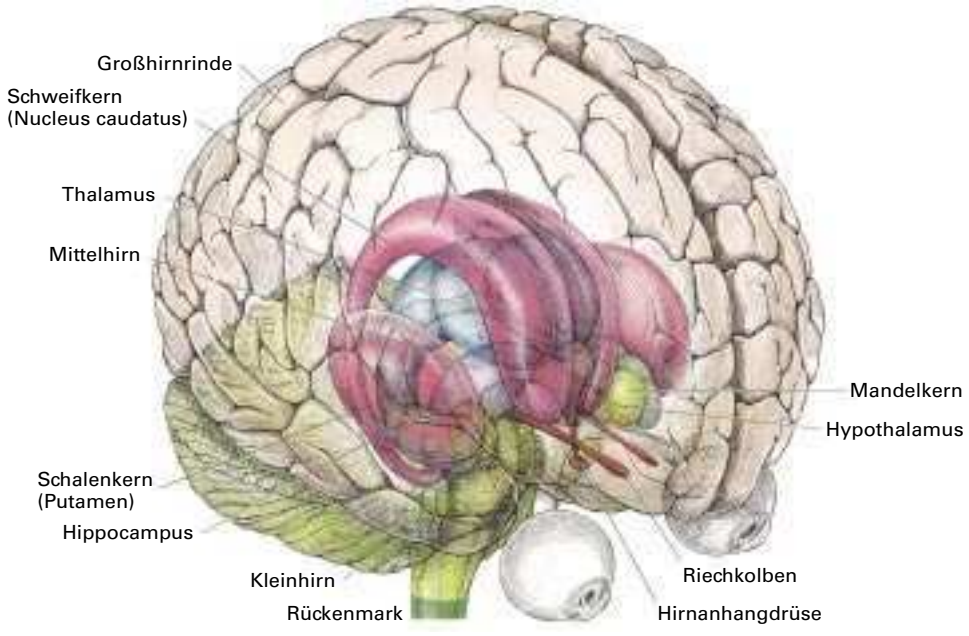
Juni 2003

Der Gehirnschnitt auf Seite 69 ist fehlerhaft. Die unten stehende Zeichnung zeigt die korrekten anatomischen Strukturen.

Auch der Wirkungsmechanismus von Koffein ist in der Grafik nicht richtig dargestellt. Adenosin aktiviert bei Anlagerung an seinen Rezeptor inhibitorische G-Proteine. Diese zerfallen daraufhin in zwei Untereinheiten. Die Alpha-Untereinheit hemmt die Aktivität der Adenylatcyclase, und die Beta/Gamma-Untereinheit sorgt dafür, dass sich die Kalium-Kanäle öffnen. Beides bewirkt eine Hemmung der neuronalen Erregungsleitung. Koffein unterbindet als Antagonist des Adenosins diese inhibitorische Kaskade. Dadurch steigt die cAMP-Konzentration, und die Schwelle zur Auslösung elektrischer Signale erniedrigt sich.

Im Gehirnschnitt auf Seite 70 wurde versehentlich eine irrelevante Struktur eingezeichnet und fälschlich als Ventrikeldach bezeichnet.

Die Redaktion



CAROL DONNER

Gehirnschnitt mit Strukturen, die für die Koffeinwirkung von Bedeutung sind. Der Streifenkörper umfasst Schweif- und Schalenkern.

SPEKTROGRAMM

VERHALTENSFORSCHUNG

Mit Mikrochip zum Pollensammeln

Nun erfüllt sich auch für Bienenforscher ein Traum, der für Vogelkundler längst Realität ist: Tun und Treiben ausgewählter Tiere in freier Wildbahn lebenslang verfolgen zu können. Bisher verfügten sie lediglich über das relativ primitive Mittel der Farbmarkierung. Doch ein winziger Radio-Frequency-Identification-Mikrochip (RFID) ermöglicht auch ihnen jetzt den Sprung ins Elektronikzeitalter. Nur einen Quadratmillimeter groß und 2,4 Milligramm schwer, behindert er das Insekt nicht, wenn er hinter dem Kopf angeklebt wird. Jürgen Tautz und seine Mitarbeiter an der Universität Würzburg haben das neue System zunächst an einer Hummelkolonie erprobt. Sie konstruierten eigens einen künstlichen Lebensraum, in dem an interessanten Stellen wie Nesteingängen oder Futterplätzen speziell für den Einsatz bei Insekten entwickelte Lesegeräte angebracht sind. Die Sensoren bestimmen Identität und Bewegungsrichtung des vorbeifliegenden Tieres. Diese Informationen werden in zentralen Datenbanken gespeichert. Als Nächstes wollen die Würzburger Forscher nun tausend Honigbienen mit den Chips bestücken, um das Geschehen im Schwarm in großem Stil zu durchleuchten und individuelle Lebensläufe in ihrer Abhängigkeit von Umwelteinflüssen und sozialen Interaktionen zu verfolgen.
(Zoology, Bd. 106/3, S. 169)

ZOOLOGIE

Flexibler Fisch in Sachen Sex

So riesig das Great Barrier Reef vor der australischen Ostküste ist, herrscht in ihm dennoch Wohnungsnot: Es mangelt an großen Korallenstöcken, in denen Fische wie die Korallengrundel *Gobiodon histrio* paarweise brüten können. Für Jungtiere ist es deshalb schwer, ein Heim und einen paarungswilligen Partner zu finden. Jean-Paul A. Hobbs von der Universität Townsville (Queensland) hat nun entdeckt, wie *G. histrio* diese Situation optimal meistert. Solange der Jungfisch allein ist und keine der größeren Korallen in Beschlag nehmen kann, bleibt er geschlechtsneutral und wartet in kleinen Stöcken auf seine Chance. Wenn dann eine der begehrten Brutstätten in der Nähe frei wird, besetzt er sie schleunigst. Außerdem muss er nun aber auch schnell einen Partner finden, damit ihm nicht etwa ein anderer Aspirant die Koralle streitig macht. Deshalb ist er nicht wählerisch, sondern gibt sich mit dem nächstbesten adulten Artgenossen zufrieden, der ihm unterkommt – gleich ob Männlein oder Weiblein. Er selbst nimmt dann praktischerweise einfach das jeweils andere Geschlecht an. Geschlechterwechsel bei adulten Fischen ist schon länger bekannt. Dass der Zeitpunkt der Reife und die Geschlechtsausprägung aber schon bei Jungfischen von sozialen Bedingungen abhängen, wurde noch nicht beobachtet. Möglicherweise existiert dieser Mechanismus bei vielen Riff-Fischen, die um Raum konkurrieren.
(Proceedings of the National Academy of Science, im Druck)

PHILIP MUNDAY, JAMES COOK UNIVERSITY

◀ Nach allen Seiten offen: Ein junger *Gobiodon histrio* wählt sein Geschlecht danach, auf welchen adulten Paarungspartner er zuerst trifft.

MEDIZIN

Flickwerk am Herzen

Aus der Not eine Tugend machten amerikanische Chirurgen bei einer todkranken Patientin. Wegen wiederholt auftretender Tumore mussten sie der 46-Jährigen beide Herzvorkammern vollständig entfernen. In Ermangelung passenden Spendermaterials griffen sie auf eine Mischung aus menschlichem und tierischem Ersatzgewebe zurück. Dieses unterzogen sie einer speziellen Vorbehandlung, die dem Gerben von Leder ähnelt, um eine Abstoßungsreaktion zu verhindern: Derart verändertes Gewebe erkennt der Körper nicht mehr als fremd. Damit rekonstruierten Bartley Griffith und James Gammie von der Universität von Maryland in Baltimore dann die entfernten Herzvorkammern. Die künstliche Nachbildung konnte sich zwar nicht zusammenziehen, aber dennoch das Blut aus der Lunge in die Hauptkammern leiten. Ein Herzschrittmacher ersetzte die natürlichen elektrischen Impulse der Vorkammern. Sollte sich die Methode bewähren, könnten möglicherweise auch andere Organe aus Gewebestücken nachgebildet werden, um die Zeit zu überbrücken, bis ein natürlicher Ersatz zur Verfügung steht. *(Chemistry & Industrie, 15.9.2003, S. 6)*

Gläserne Biene dank aufgeklebtem Mikrochip

BEEGROUP WÜRZBURG / FIOLA BOCK

GEOLOGIE

Massensterben durch Methan

GEOMAR

Vom Meeresboden aufgestiegenes Methanhydrat zersetzt sich sprudelnd an der Oberfläche.

Plötzliche Eruptionen von Sumpfgas sind seltene, aber durchaus bekannte Gefahren in Gewässern. Doch nun behauptet der Geologe Gregory Ryskin von der Northwestern University in Evanston (Illinois), dass eine massive Freisetzung von Methan – so der chemische Name des Gases – sogar das größte Massensterben in der Erdgeschichte verursacht haben könnte. Vor 251 Millionen Jahren, an der Zeitenwende vom Perm zur Trias, verschwanden 95 Prozent aller marinen Arten und siebzig Prozent aller Landlebewesen. Die Ursache ist noch nicht endgültig geklärt. Diskutiert werden Meteoriteneinschläge, Vulkanausbrüche und Klimaverschiebungen. Ryskin erweitert dieses Sortiment nun um eine gewagte Idee – die allerdings so ganz neu nicht ist: Bei weniger großen Massensterben haben Forscher schon Hinweise auf die explosive Zersetzung von Methanhydrat, einer eisartigen Form des Gases, am Meeresboden gefunden. Methan bildet sich dort durch bakterielle Zersetzung herabrieselnden organischen Materials. Bei dem hohen Wasserdruck bleibt es zunächst in der Tiefsee gefangen. Ryskin berechnete, dass sich mehrere 10 000 Gigatonnen auf diese Art ansammeln könnten. Doch irgendwann werde die Situation instabil. Dann genüge eine kleine Störung, dass das Gas unter Umwälzung des Meeres gewaltsam entweicht. Die Sprengkraft könne das 10 000fache einer Explosion des gesamten heutigen Nuklearwaffenarsenals erreichen. Für die Methantheorie spricht, dass die großen marinen Strömungssysteme gegen Ende des Perms stagnierten. Auch weist die chemische Zusammensetzung der Fossilien auf eine Anreicherung von Kohlendioxid in der Atmosphäre hin – Folge der Oxidation des freigesetzten Methans an der Luft. *(Geology, Bd. 31, S. 741)*

ARCHÄOLOGIE

Und die Bibel hat doch Recht

Laut Altem Testament ließ der judäische König Hiskia in Jerusalem einen Tunnel graben, der Wasser von der außerhalb gelegenen Gihonquelle in das Siloam-Becken im Stadtinneren leitete. Dadurch rettete er die Stadt vor der assyrischen Belagerung im Jahre 701 v. Chr. Noch heute gibt es einen 530 Meter langen und bis zu 30 Meter tiefen Tunnel zwischen den beiden Wasserstellen. Sein Ursprung ist allerdings umstritten. Viele Archäologen schließen aus indirekten Indizien, dass er erst ein halbes Jahrtausend nach der assyrischen Belagerung gebaut wurde. Israelische Archäologen von der Hebräischen Universität und dem Geologischen Dienst in Jerusalem rehabilitierten nun jedoch den biblischen Bericht. Sie untersuchten Pflanzen- und Holzreste aus der ursprünglichen Putzschicht der Tunnelwände sowie Kalkablagerungen – darunter Stalaktiten –, die sich seit dem Tunnelbau gebildet hatten. Radiometrische Altersbestimmungen an den Universitäten Oxford und Reading bestätigten ein Datum von etwa 700 v. Chr. Mit dem 2700 Jahre alten Tunnel wurde erstmals ein in der Bibel erwähntes Bauwerk exakt datiert. *(Nature, 11.9.2003, S. 169)*

ISRAEL NATURE AND PARKS AUTHORITY

Abstieg zum Siloam-Tunnel unter Jerusalem, dessen biblisches Alter nun durch radiometrische Datierung bestätigt wurde.

NEUROBIOLOGIE

Der Sitz der Ortskenntnis

Die Berufserfahrung eines Taxifahrers lässt sich an seinem Gehirn erkennen. Mit dem Ortswissen wächst nämlich auch der Hippocampus, eine Region der Großhirnrinde, die eine zentrale Rolle bei der Gedächtnisbildung spielt. Wie aber die Karte im Kopf auf neuronaler Ebene funktioniert, ist erst in Ansätzen geklärt. Bei Ratten haben Forscher in Irrgarten-Experimenten mittels Elektroden im Gehirn nachgewiesen, dass einzelne Nervenzellen im Hippocampus feuern, wenn sich das Tier einem bekannten Ort nähert. Diese Ortsneuronen sind stets an einer bestimmten Position im Raum aktiv und bilden auf diese Weise eine neuronale Karte der Außenwelt. An gesunden Menschen verbieten sich solche Experimente. Deshalb griff ein Team um Arne Ekstrom von der Brandeis-Universität in Waltham (Massachusetts) und Itzhak Fried von der Universität von Kalifornien in Los Angeles nun auf Epilepsie-Patienten in klinischer Behandlung zurück. Diese waren ohnehin mit Elektroden im Kopf verdrahtet, damit der Anfallsherd bestimmt werden konnte. In einer Computersimulation schlüpften sie in die Rolle des Taxifahrers in einer virtuellen Stadt. Die Aktivität ihres Gehirns während der Navigation zeigte, dass auch beim Menschen hippocampale Ortsneuronen eine Art geistiger Karte bilden. Zusätzlich identifizierten die Forscher aber auch Nervenzellen im angrenzenden Cortex, die bei bloßer Sichtung charakteristischer Orientierungspunkte schon aktiv wurden.
(Nature, 11.9.2003, S. 184)

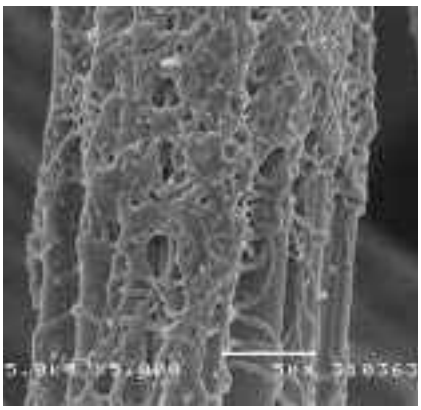
REED HUTCHINSON AND LYNNE OLSON / UCLA PHOTOGRAPHIC SERVICES

Nervenzellen im Hippocampus bilden die Außenwelt ab.

BIOTECHNOLOGIE

Strom aus Zucker

Schon seit langem basteln Forscher an bakterienbetriebenen Brennstoffzellen. Mit *Rhodoferax ferrireducens* scheinen sie nun ihrem Ziel ein gutes Stück näher gekommen zu sein. Das Purpurbakterium lebt in sauerstofffreien Sedimenten, wo es durch die Oxidation organischen Materials Energie gewinnt. Die dabei frei werdenden Elektronen überträgt es normalerweise auf Eisen. In der kleinen Brennstoffzelle der Forscher wandern die Ladungsträger dagegen von der Anode über einen externen Stromkreis zur Kathode. Das Besondere an *R. ferrireducens*: Es schwimmt nicht frei in der Nährlösung, sondern siedelt auf der Elektrode selbst. So gelangen die Elektronen direkt in den Stromkreis, und teure, giftige »Mediator«-Substanzen, die bisher für den Transport zur Anode erforderlich waren, erübrigen sich. Außerdem ist *R. ferrireducens* nicht wählerisch bei seiner Nahrung und kann bis zu 83 Prozent der freigesetzten Elektronen in den Stromkreislauf einspeisen – ein bisher einzigartiger Wirkungsgrad. Die Umsetzung geschieht zwar nur langsam, aber immerhin reicht ihre Geschwindigkeit, um mit einem halben Pfund Zucker eine 60-Watt-Birne 17 Stunden lang zum Leuchten zu bringen. Ein Handy verbraucht in vier Tagen sogar nur einen Zuckerwürfel. *(Nature Biotechnology, 10. 1038/nbt867)*



D. LOVELY UND S. CHAUDHURY, UNIVERSITY OF MASSACHUSETTS, AMHERST

Auf der Anode einer Brennstoffzelle erzeugt *Rhodoferax ferrireducens* mit konkurrenzlos hohem Wirkungsgrad elektrischen Strom.

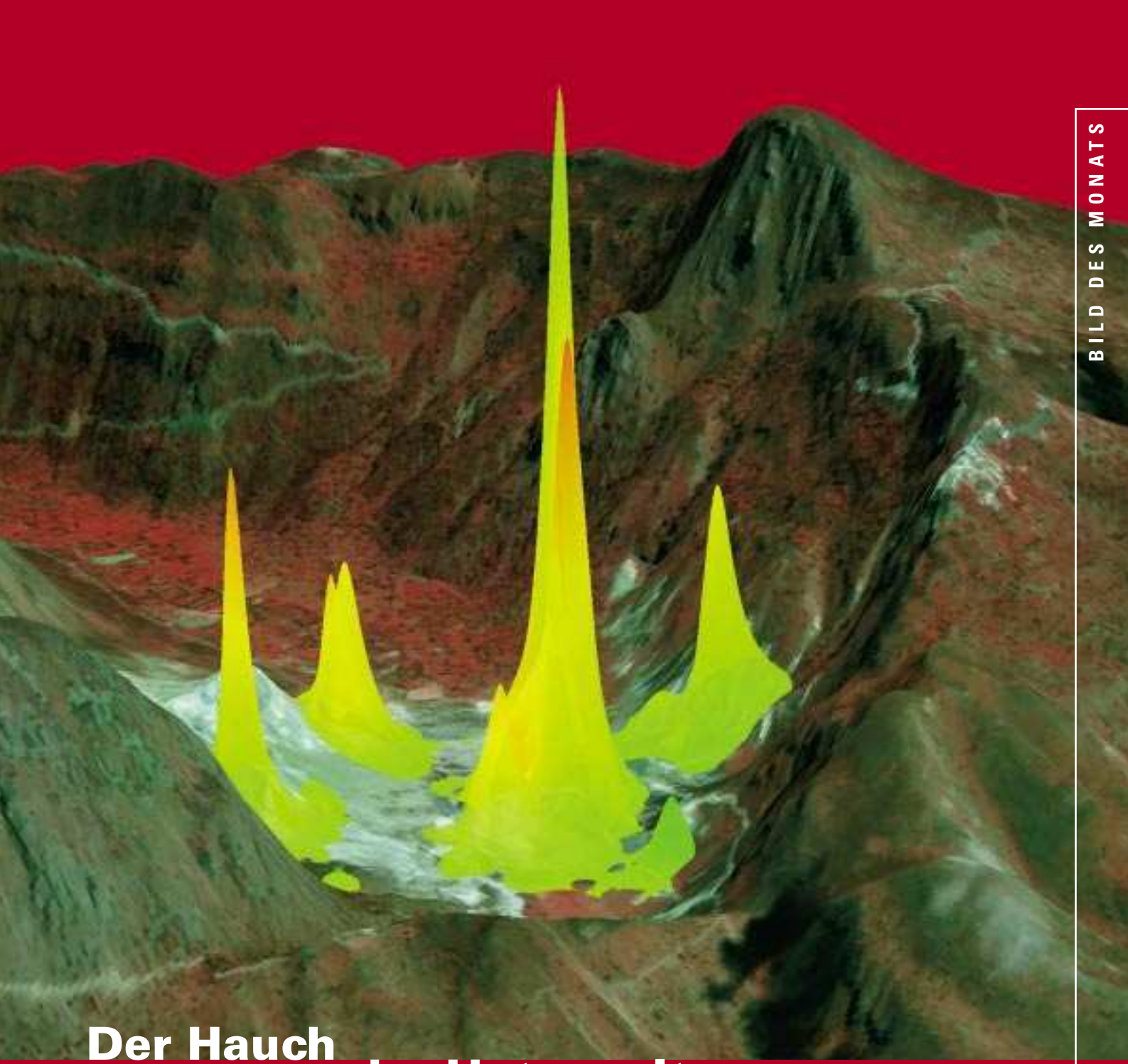
ASTRONOMIE

Halley grüßt aus frostiger Ferne

Alle 76 Jahre stattet der Komet Halley der Sonne einen Besuch ab. Dabei war er zuletzt vor 17 Jahren von der Erde aus mit bloßem Auge zu sehen. Derzeit zieht er in 4,1 Milliarden Kilometer Entfernung seine einsame Bahn. Im Rahmen einer Suche nach eisigen Körpern am Rand des Sonnensystems ist es nun erstmals gelungen, ihn so weit draußen zu entdecken. Ganze 81 Aufnahmen mit drei der vier 8-Meter-Teleskope der Europäischen Südsternwarte Eso auf dem Paranál in Chile mussten die Astronomen überlagern, um den fernen Wanderer als winzigen Fleck sichtbar zu machen. Umgeben von klirrender Kälte, ist Halley derzeit inaktiv und auf seinen birnenförmigen, zehn Kilometer langen Kern aus Eis und Staub reduziert. Von dem ohnehin spärlich auftreffenden Sonnenlicht reflektiert er nur vier Prozent und ist damit noch viel dunkler als Kohle. Auf irdische Verhältnisse übertragen, entspricht seine Beobachtung der Sichtung eines fünf Zentimeter großen Kohlestücks bei Dämmerlicht aus 20 500 Kilometer Entfernung. Im Jahre 2023 nähert sich Halley dem äußeren Wendepunkt seiner Umlaufbahn und beginnt seine Rückkehr in das innere Sonnensystem, wo er 2062 wieder ein eindrucksvolles Schauspiel geben wird.
(Eso-Presseinformation, 1.9.2003)

EUROPEAN SOUTHERN OBSERVATORY (ESO)

Als winziger Fleck erscheint Halley (rot eingekreist) auf dieser Kombination von 81 Belichtungen mit den Eso-Teleskopen in Chile.



Der Hauch der Unterwelt

Große, dicht bevölkerte Teile Süd- und Südosteuropas liegen in Reichweite ruhender Vulkane, die jederzeit wieder erwachen können. Im Rahmen des EU-Projekts »Geowarn« wird deshalb seit 1999 beispielhaft unter anderem der schlafende, aber geodynamisch aktive Vulkan Nisyros südlich von Kos in der Ägäis mit modernsten Methoden überwacht. Die Fülle an Daten aus Satellitenbeobachtungen und kontinuierlichen Messungen vor Ort geht in ein geografisches Informationssystem ein, mit dem sich gleichzeitig mehrere Parameter analysieren und korrelieren lassen. Auch die anschauliche Visualisierung von Zusammenhängen ist möglich. Hier wurden einer entzerrten, dreidimensional dargestellten Satellitenaufnahme von Nisyros der Ausstrom an Kohlendioxid und die Temperatur an verschiedenen Punkten des Kraterbodens überlagert – beides wichtige Indikatoren der Aktivität im Untergrund. Der Gasfluss ist durch die Höhe der Kegel und die Temperatur durch die Farbe wiedergegeben. Offenkundig hängen die zwei Parameter eng miteinander und mit den Standorten der hydrothermalen Schlote zusammen. Behörden und Forscher haben per Internet Zugang zu dem Datensatz und können so rasch Risiken einschätzen und Krisenpläne erarbeiten.

INSTITUT FÜR KARTOGRAPHIE, EIDGENÖSSISCHE TECHNISCHE HOCHSCHULE ZÜRICH

IMMUNOLOGIE

Handschellen für das Aids-Virus

Mit einer Tarnkappe aus Zuckermolekülen, die es bei seinem Wirt entleiht, versteckt sich das Aids-Virus vor dem Immunsystem. Doch ein neu entdeckter Antikörper mit ungewöhnlicher Struktur lässt sich nicht täuschen.

Von Katrin Schaller

Es ist ein Meister des Versteckspiels: Permanent verändert das Human-Immunschwäche-Virus (HIV), der Erreger von Aids, jene Bereiche seiner Hülle, an denen das Immunsystem den Eindringling als fremd erkennt. Dieser unablässige Wechsel der Verkleidung lässt die Abwehrmaschinerie des Opfers ins Leere laufen. Zugleich hat er als Miniatur-Evolution im Zeitraffer weltweit innerhalb kürzester Zeit eine Reihe von Subklassen des Erregers entstehen lassen. Selbst ein und dieselbe Person kann gleichzeitig mehrere verschiedene Virustypen beherbergen.

Auch die Bekämpfung des Krankheitserregers mit Medikamenten gestaltet sich dadurch problematisch: Das überaus wandlungsfreudige HI-Virus wird gegen die gängigen Pharmaka sehr schnell resistent. Umso wichtiger ist es, die Infektion überhaupt zu vermeiden.

Deswegen wird seit Jahren intensiv an einem Impfstoff geforscht. Doch auch das ist ein schwieriges Unterfangen. Denn ein geeignetes Vakzin muss zahlreiche Bedingungen erfüllen. So sollte es möglichst gegen alle HIV-Subtypen wirken. Zudem müsste es sämtliche Übertragungswege abdecken, also sowohl eine Infektion über die Schleimhäute beim Geschlechtsverkehr als auch eine Ansteckung über direkten Blutkontakt verhindern. Da das Virus nicht nur frei im Körper vorliegt, sondern sich auch in Blutzellen einnistet, sollte der Impfstoff außer der humoralen auch die zelluläre Immunantwort aktivieren; während Erstere mit Antikörpern (Immunglobulinen) und so genannten B-Lymphocyten operiert, führt letztere T-Lymphocyten in Form von Helfer- und Killerzellen ins Feld. Nicht zuletzt wäre dafür zu sorgen, dass das Virus keine Fluchtmechanismen entwickeln kann, die das Vakzin innerhalb kurzer Zeit wirkungslos machen.

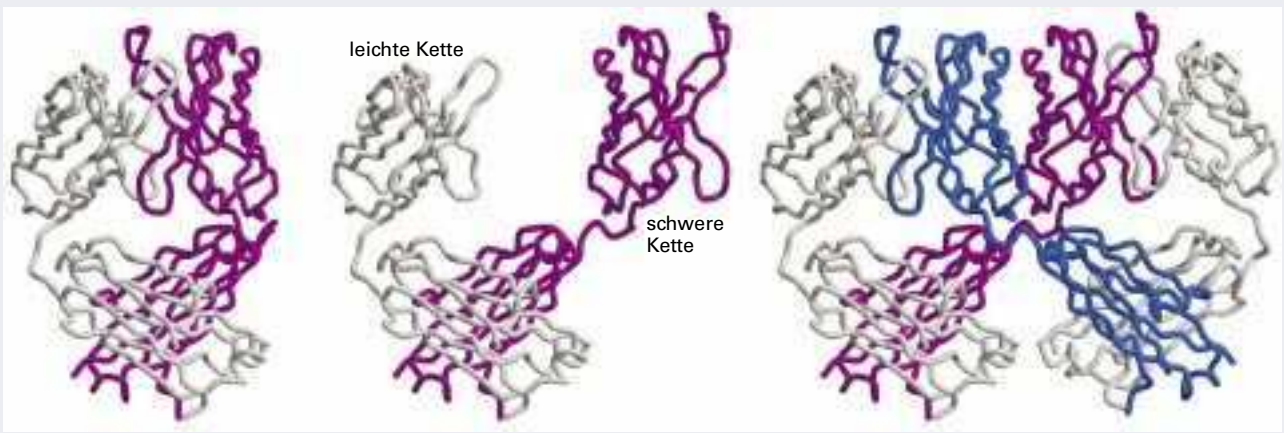
Angesichts so vieler Anforderungen wundert es kaum, dass der große Durchbruch bisher ausblieb. Hoffnung machen jedoch die wenigen HIV-Infizierten, deren Immunsystem das Virus dauerhaft in Schach hält, sodass sie keine Krankheitssymptome zeigen. Eine Immunisierung ist also möglich.

Die resistenten HIV-positiven Personen sind für die Impfstoff-Jäger natürlich von größtem Interesse. Worauf beruht ihre erfolgreiche Virusabwehr? Offenbar erzeugen sie besonders schlagkräftige Antikörper; denn es ist gelungen, drei verschiedene Immunglobuline aus ihnen zu isolieren, die hoch effektiv mehrere Virus-Subtypen eliminieren. Bei Versuchen im Tiermodell sorgten diese Antikörper für eine passive Immunisierung: Damit geimpfte Affen waren vor einer Infektion geschützt, wenn sie danach mit SHI-Viren – der für Affen pathogenen Form des HIV, die Merkmale von dessen Hülle trägt – in Kontakt gebracht wurden.

Ein besonders potenter Antikörper

Einer ersten klinischen Studie mit sieben HIV-Positiven zufolge vertragen Menschen solche Antikörper-Infusionen gut. Allerdings wirkt die passive Immunisierung nur kurze Zeit, da die injizierten Fremd-Antikörper innerhalb weniger Wochen abgebaut werden. Außerdem ist sie sehr teuer, und der Impfstoff lässt sich nur in kleinen Mengen gewinnen. Des-

Verzahnung durch Partnertausch



Im Bindungsarm von normalen Immunglobulinen (links) biegt sich die schwere Kette (lila) zur leichten (grau) hin. Beim Antikörper 2G12 schwenkt sie jedoch von ihr weg (Mitte). Da dasselbe auf dem zweiten Bindungsarm geschieht, kommt es zu einem Partnertausch (rechts): Die beiden schweren Ketten (lila bzw. blau) überkreuzen sich und verbinden sich an ihrem oberen Ende jeweils statt mit der eigenen mit der gegenüberliegenden leichten Kette. Dadurch werden die beiden Arme miteinander verzahnt. Außerdem rücken die schweren Ketten so dicht zusammen, dass auch zwischen ihnen Van-der-Waals- und Wasserstoffbrücken-Bindungen auftreten, welche die Struktur zusätzlich stabilisieren.

halb bleibt es vorrangiges Ziel, eine aktive Immunisierung zu erreichen, welche die Bildung hoch wirksamer Antikörper durch das Immunsystem stimuliert.

Doch auch hier gab es jüngst beachtliche Fortschritte. So ließ sich für den besonders potenten Antikörper 2G12, den ein internationales Team um Hermann Katinger an der Universität für Bodenkultur in Wien vor rund zehn Jahren aus einem resistenten HIV-positiven Menschen isoliert hatte, im vergangenen Jahr die Angriffsstelle entschlüsseln *(Journal of Virology, Bd. 76, S. 7306)*. Demnach handelt es sich um bestimmte Ketten aus Zuckermolekülen auf der Virushülle.

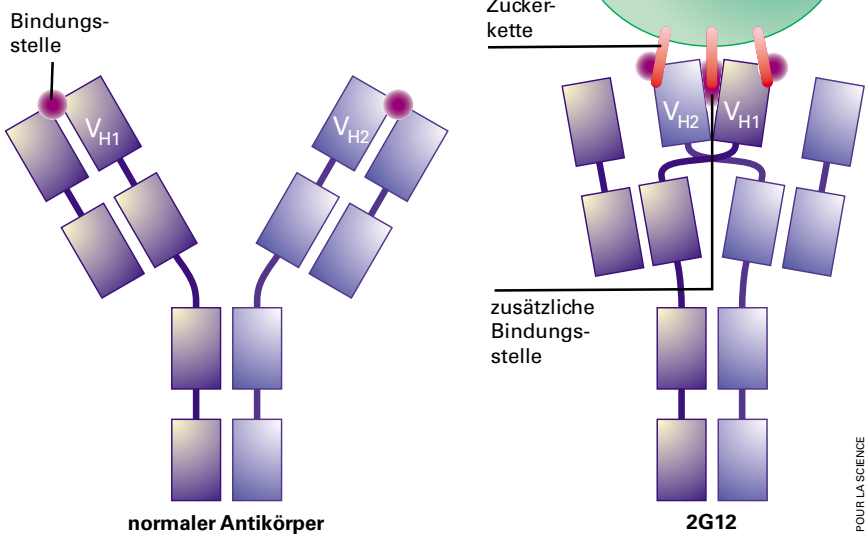
Indem sich 2G12 an solche Kohlenhydrate heftet, unterläuft er eine zentrale Verteidigungsstrategie des kleinen Eindringlings. Um sich vor Angriffen des Immunsystems zu schützen, operiert das HI-Virus nämlich nicht nur mit den schon erwähnten Verwandlungstricks, sondern maskiert sich zusätzlich mit Zuckerketten, die auf menschlichen Zellen häufig vorkommen. Es hängt sie an die Proteine an, die seine Hülle aufbauen und vom Verteidigungssystem des Wirtes als fremd erkannt würden. So zieht sich HIV gewissermaßen eine süße Tarnkappe über.

Normalerweise sind Antikörper nur auf Proteine scharf und lassen Kohlenhydrate links liegen. Warum 2G12 aus dem Rahmen fällt, war deshalb zunächst ein Rätsel. Doch nun fand sich die Erklärung in der besonderen Struktur seiner Antigen bindenden Region. Ein internationales Team um Dennis Burton und Ian Wilson vom Scripps Research Institute in La Jolla hat sie gemeinsam mit Katinger per Röntgenstrukturanalyse aufgeklärt *(Science, Bd. 300, S. 2065)*.

Verschränkte Arme erzeugen zusätzliche Bindungsstelle

Die üblichen Antikörper sehen aus wie ein Y. Sie bestehen aus zwei Paaren identischer Proteinketten, von denen die längere als schwere, die kürzere als leichte Kette bezeichnet wird. Das Standbein des Y und die an der Gabelung ansetzenden unteren Bereiche der kurzen Arme sind konstant, also bei allen Immunglobulinen einer Klasse gleich. Die äußeren Enden der Arme dagegen bilden die Hände zum gezielten Ergreifen einer charakteristischen Zielstruktur (Epitop) auf dem Fremdkörper (Antigen). Diese Antigen bindenden Regionen sind deswegen variabel, also bei jedem Antikörper individuell gestaltet.

Dank seiner besonderen Gestalt kann 2G12 drei Zuckerketten (rotbraun) packen, die auf dem Oberflächenprotein gp120 des Aids-Virus sitzen. Zwei davon greift der Antikörper mit den beiden verzahnten Bindungsarmen, die dritte mit dem schmalen Spalt dazwischen.



Das jetzt untersuchte 2G12 weicht von diesem Grundbauplan entscheidend ab. Bei ihm öffnen sich die beiden Bindungsarme nicht wie beim Y, sondern verzahnen sich zu einer lang gestreckten Struktur, die eher einem I gleicht. Schuld daran sind minimale Abweichungen im chemischen Aufbau des Antikörpers: An einzelnen Punkten sind die üblichen Aminosäuren durch andere ersetzt.

Beispielsweise befindet sich in der Kontaktregion zwischen der leichten und der schweren Kette am äußeren Ende des Bindungsarms an entscheidender Stelle statt eines Glutamins ein Arginin. Dieses ist auf Grund seiner räumlichen Struktur von seinem normalen Bindungspartner zu weit entfernt, um mit ihm in Kontakt zu treten. Die beiden Ketten werden an dieser Stelle folglich nicht mehr richtig zusammengehalten. Außerdem nimmt jeweils am Scharnier zwischen dem variablen und dem konstanten Bereich der schweren Kette ein Prolin die Stelle des sonst vorhandenen Serins ein. Dadurch knicken die beiden schweren Ketten an diesem Punkt ab und folgen nun nicht mehr der leichten Partnerin am eigenen Arm, sondern wenden sich deren Gegenstück auf dem anderen Ast zu.

Dieser kuriose Partnertausch verzahnt die beiden Bindungsarme miteinander und sorgt für die lang gestreckte Form des Antikörpers. Zugleich rücken die variablen Enden der beiden schweren Ketten so dicht zusammen, dass auch zwischen ihnen nun anziehende Kräfte auftreten: Es bilden sich mehrere Wasserstoffbrücken-Bindungen und Van-der-Waals-Kontakte. Dadurch wird die ungewöhnliche, gestreckte Konfiguration zusätzlich stabilisiert.

Es ist diese ausgefallene Struktur, die den Antikörper zu einer so außergewöhnlich effektiven Waffe gegen HIV macht. Mit seinen beiden Bindungsarmen greift sich 2G12 je eine Zuckerkette, die das Hüllprotein des Virus kaschiert. Zusätzlich entsteht beim Verzahnen der beiden Bindungsarme ein schmaler Spalt, in den ein weiterer Zuckerrest wie angegossen passt.

Der Clou dabei ist, dass die drei Kohlenhydratketten, an die sich der Antikörper heftet, zwar vom Menschen entliehen, auf dem Virus aber anders angeordnet sind. Mit seiner ungewöhnlichen räumlichen Struktur fügt sich 2G12 exakt an diese spezifische Konstellation an, entlarvt so die Maskerade des Virus und markiert es als Angriffsziel für die Immunzellen. ▷

▷ Die neuen Einsichten in den Funktionsmechanismus von 2G12 sollten die Entwicklung eines Impfstoffs einen großen Schritt voranbringen. Die besondere Struktur des Antikörpers kann nun als Vorlage dienen, um aus Kohlenhydraten ein Antigen zu konstruieren, welches das Immunsystem zur Produktion von 2G12 anregt. Dieses Immunglobulin enthält zwar mehrere ausgefallene Mutationen, doch ist das grundsätzlich nichts Außergewöhnliches. Die meisten hoch wirksamen Antikörper weisen Abweichungen vom genetischen Grundbauplan auf. Daher sollte das Immunsystem eines jeden Menschen fähig sein, bei der Präsentation eines geeigneten Antigens auch diese ungewöhnliche Abwehrwaffe zu produzieren. Allerdings bleibt vorerst offen, ob sie allein ausreicht, HIV in Schach zu halten. ◁

Katrin Schaller ist promovierte Biologin und arbeitet als freie Wissenschaftsjournalistin bei Heidelberg.

MEERESBIOLOGIE

Bakterium bleicht Korallen aus

Nach verbreiteter Ansicht ist die globale Erwärmung schuld am Korallensterben. Untersuchungen im Mittelmeer zufolge könnte die Ursache in Wahrheit aber eine Infektionskrankheit sein, deren Erreger in der Hitze besonders aktiv ist und von einem Wurm übertragen wird.

Von Pia Prasch

Im flachen, lichtdurchfluteten Wasser der Korallenriffe leben viele der farbenprächtigsten und bizarrsten Organismen unseres Planeten. Wie ein Gürtel umspannen die küstennahen Korallengärten den Erdball beidseits des Äquators, wo die Sonne das Meer das ganze Jahr hindurch so warm hält, dass tropische Tiere und Pflanzen darin gedeihen können. Aber auch in gemäßigteren Breiten gibt es vereinzelt solche oberflächennahen Korallenriffe. Voraussetzung sind Wassertemperaturen, die ganzjährig in einem Bereich zwischen etwa 18 und 30 Grad Celsius liegen.

Genau diese Temperaturabhängigkeit wurde den empfindlichen Ökosystemen nach verbreiteter Ansicht in den letzten Jahrzehnten mehr und mehr zum Verhängnis. Beobachtungen zufolge sterben die Riff bildenden Korallen, die das Fundament der artenreichen Unterwasserwelt schaffen, bei Temperaturen über 30 Grad Celsius ab. Wo sich einst Hunderte von bunten Fischen, Seesternen, Krebsen, Schnecken und Seeigeln tummelten, bleiben nur kahle, leblose Kalkskelette zurück.

Gleichgewicht aus Geben und Nehmen

Seit 1900 hat sich das Oberflächenwasser der Ozeane im Zuge des Klimawandels weltweit um durchschnittlich ein Grad Celsius erwärmt. Modellrechnungen zufolge soll die Temperatur bis zum Jahr 2100 um weitere 1,7 bis 4 Grad ansteigen. Die meisten Korallenriffe würden dies wohl nicht überleben, ein Großteil wäre schon Mitte des Jahrhunderts abgestorben. Doch nun wecken israelische Forscher Hoffnung, das Desaster vermeiden zu können. Sie haben Hinweise darauf gefunden, dass nicht die hohen Temperaturen selbst die zerstörerische Wirkung ausüben, sondern Bakterien, die in der Wärme besonders infektiös sind.

Das verästelte weiße Kalkgestein, das auf exotischen Märkten als Koralle zum Kauf angeboten wird, ist letztlich nichts weiter als das leblose Ausscheidungsprodukt Riff bildender Polypen. Es dient den Tieren als Untergrund, auf dem sie wachsen und sich vermehren. Korallenstöcke sind also Kolonien mit Tausenden von Bewohnern.

Eine Besonderheit aller Riffe bildenden Polypen in den Tropen ist, dass sie eine Symbiose mit Photosynthese treibenden Algen eingehen. Diese Zooxanthellen verleihen dem Korallenstock seine typische gelblich grüne Färbung. Sie leben im Innern der Hautzellen des Polypen, wo sie vor Fressfeinden geschützt sind und von ihrem Wirt mit Stickstoff, Phosphor und anderen Mineralstoffen versorgt werden. Im Gegenzug geben sie Sauerstoff und Kohlenhydrate an die Polypen ab. Da die Wirtstiere daraus einen Großteil ihres Energiebedarfs decken, gedeihen sie besser, was auch das Wachstum des Korallengerüstes erheblich beschleunigt.

Erwiesen ist, dass das empfindliche Gleichgewicht aus Geben und Nehmen bei Temperaturen über 30 Grad Celsius durcheinander gerät. Die Polypen stoßen dann die Algen ab, wodurch der Korallenstock seine Farbe verliert. Einige Zeit kann er auch ohne seine pflanzlichen Ernährer überleben. Sinkt die Wassertemperatur rechtzeitig wieder, siedeln sich erneut Zooxanthellen an: Das Korallenriff erholt sich wieder. Wenn die Algen aber länger fortbleiben, kann der Nährstoffmangel nicht mehr überbrückt werden, und die Polypen sterben ab.

Solange der Hitzestress als alleinige Ursache der Misere galt, schienen Maß-

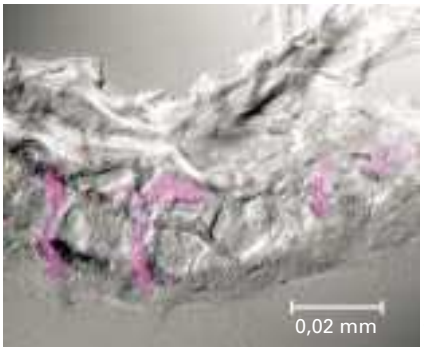
NAS / FRED MC CONNAUGHEY / OKAPIA

Der Feuerwurm *Hermodice carunculata* infiziert im Mittelmeer vor Israel jeden Sommer von neuem die Steinkoralle *Oculina patagonica* mit dem Bakterium *Vibrio shiloi*, das in seinem Innern überwintert hat.

MAOZ FINE

Die Koralle *Oculina patagonica* zeigt sieben bis zehn Tage nach Kontakt mit dem Feuerwurm erste entfärbte Bereiche im Zentrum (oben) und ist nach 17 Tagen völlig ausgebleicht (unten).

Unter der Haut des Feuerwurms finden sich lokale Ansammlungen von *Vibrio shiloi* (farbig).



MAOZ FINE

nahmen zum Klimaschutz – vor allem eine drastische Reduktion des vom Menschen verursachten Ausstoßes an dem Treibhausgas Kohlendioxid – die einzige, wenn auch fast aussichtslose Möglichkeit zu sein, dem Korallensterben Einhalt zu gebieten. Doch Ende der 1990er Jahre entdeckten Wissenschaftler um Yossi Loya und Eugene Rosenberg von der Universität Tel Aviv, dass zumindest bei der mediterranen Steinkoralle *Oculina patagonica* ein Bakterium das Absterben und Ausbleichen verursacht. Wie sich zeigte, ist *Vibrio Shiloi* – so der Name der todbringenden Mikrobe – in warmem Wasser wesentlich infektiöser als in kälterem. Das erklärt die Beobachtung, dass sich die Bleiche bei höherer Temperatur schneller ausbreitet. Vor der Küste Israels waren in den letzten zehn Sommern regelmäßig 80 bis 90 Prozent aller Stöcke von *Oculina patagonica* mit dem Bakterium infiziert und blichen aus, sobald die Wassertemperatur ihr Maximum von 30 bis 31 Grad Celsius erreichte.

Doch im Winter erholten sich die Korallen wieder. In Einklang damit stellten die israelischen Forscher fest, dass sich *Vibrio Shiloi* nur während der Sommermonate in den Zellen der Polypen aufhält. Bei Temperaturen unter 20 Grad Celsius verschwindet das Bakterium aus den Korallen. Aber wo überwintert es?

Wurm als Winterquartier

Nun fanden die Wissenschaftler auch die Antwort auf diese Frage. Mit einem Sondenmolekül, das sich spezifisch an die Bakterien-DNA anlagert und das zum leichteren Nachweis mit einem Fluoreszenzfarbstoff gekoppelt worden war, behandelten sie Proben von Meerwasser, Sediment und Meeresorganismen aus dem Korallenriff während des Winters. Dabei entdeckten sie nur in einer Tierart hohe Konzentrationen von *Vibrio Shiloi*: dem marinen Feuerwurm *Hermodice carunculata*. Offenbar ist dies der Zufluchtsort, an dem das Bakterium die kalte Jahreszeit übersteht.

Laborversuche lieferten die Bestätigung. Dabei setzten die Wissenschaftler Feuerwürmer in ein mit Meerwasser gefülltes Becherglas und gaben *Vibrio Shiloi* zu. Mit Hilfe der fluoreszierenden Sonde konnten sie zeigen, dass sich nach 36 Stunden nur noch fünf Prozent der Bakterien im Meerwasser aufhielten. Alle anderen waren in den Wurm eingedrungen und schimmerten dank der angehefteten Sondenmoleküle durch seine Haut. Allerdings verharrt *Vibrio Shiloi* in seinem lebenden Winterquartier in einem Ruhezustand und vermehrt sich nicht. Wenn im Frühjahr die Temperaturen steigen und der Feuerwurm beginnt, die Korallenstöcke abzuweiden, überträgt er die Erreger wieder auf die Polypen.

Auch dafür lieferten die israelischen Forscher den Beweis. Sie brachten infizierte Würmer in Aquarien mit insgesamt sechs gesunden Korallenstöcken. Alle waren nach spätestens sechs Wochen völlig ausgebleicht. In Vergleichsuntersuchungen mit Feuerwürmern, die entweder gar nicht oder mit einem anderen Bakterium infiziert waren, blieben in derselben Zeit von sieben Korallenstöcken sechs völlig gesund.

Dennoch überzeugen die Untersuchungen keineswegs alle Experten. ▷

Zum Beispiel vertritt Ove Hoegh-Guldberg, Leiter des Zentrums für marine Studien an der Universität von Queensland in Brisbane (Australien), die Meinung, dass sich die Korallenbleiche zu schnell ausbreitet, als dass es sich um eine von einem Zwischenwirt übertragene Infektionskrankheit handeln könnte. Doch die israelischen Wissenschaftler glauben, diesen Einwand entkräften zu können. Ihrer Ansicht nach ließe sich die rasche Ausbreitung dadurch erklären, dass Zooxanthellen, die von kranken Polypen abgestoßen wurden und mit Bakterien behaftet sind, von gesunden Korallen aufgenommen werden.

Mit dem marinen Feuerwurm ist jedenfalls zum ersten Mal ein lebender Überträger einer Korallenkrankheit entdeckt worden. Das eröffnet die Möglichkeit, gezielt gegen das Ausbleichen der Riffe vorzugehen. Das israelische Forscherteam ist nach eigenem Bekunden auch schon dabei, Methoden zu entwickeln, welche die Verbreitung des Erregers verhindern sollen. Über Einzelheiten macht es allerdings keine Angaben. Die Ausrottung des mediterranen Feuerwurms dürfte jedenfalls kaum ein adäquates Mittel sein.

Ungeklärt ist auch noch, inwieweit sich die Ergebnisse auf andere Regionen übertragen lassen. *Vibrio shiloi* und der Feuerwurm sind wohl nur im Mittelmeer bei *Oculina patagonica* für die Bleiche verantwortlich. Loya und Rosenberg vermuten allerdings, dass ein Großteil der Korallenarten in anderen Riffs weltweit durch ähnliche Erreger und Überträger infiziert wird. So ist erst kürzlich im Roten Meer das Bakterium *Vibrio coralliilyticus* als Verursacher der dortigen Korallenbleiche entlarvt worden, und auch vor Brasilien haben Forscher krankheitserregende *Vibrio*-Stämme identifiziert.

Pia Prasch ist Diplom-Biologin und freie Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.

ALTERTUMSFORSCHUNG

Streit um Deutung des ältesten Original-Schriftstücks Europas

Seit seiner Entdeckung vor vierzig Jahren ist der vorsokratische »Papyrus Derveni« in seiner Bedeutung ebenso unangefochten wie in seiner Deutung umstritten. Erst jetzt liegt die erste komplette Transkription samt englischer Übersetzung vor.

Von Richard E. Schneider

Zeit und Olymp können beide als lang bezeichnet werden, jedoch nicht der Himmel, der nämlich weit ist.« In diesem leicht rätselhaften, leicht philosophischen Stil sind auch die übrigen 25, größtenteils nur sehr fragmentarisch erhaltenen Kolumnen des »Papyrus Derveni« abgefasst. Sein Name leitet sich von seinem Fundort ab, einem Dorf bei Thessaloniki in Nordgriechenland, in dem die Schriftrolle 1962 entdeckt wurde. Der Papyrus lag im Grab eines feuerbestatteten Angehörigen der Kriegerkaste neben der verbrannten Leiche, weshalb die ersten, äußeren Seiten – und damit der Anfang der Papyrusrolle – in der Mitte völlig verkohlt und unleserlich waren.

Die Bestattung fand nach übereinstimmender Ansicht der Experten um etwa 330 – 340 v. Chr. statt. Dies lässt sich sehr genau bestimmen, weil in Derveni noch mehrere andere Gräber aus jener Zeit entdeckt wurden.

Der Text selbst entstand bereits einige Jahrzehnte früher. Er wurde Analysen zufolge um etwa 380 – 360 v. Chr. mit Feder auf den Papyrus geschrieben. Damit ist er das älteste im Original erhaltene europäische Schriftstück und als solches von überragender Bedeutung für die Geisteswissenschaften, speziell die Philosophie. Abgesehen von Inschriften sind literarische Zeugnisse aus dem vorsokratischen Griechenland nur in Abschriften oder Übersetzungen aus den ersten nachchristlichen Jahrhunderten erhalten. Wer den Papyrus verfasste – oder lediglich eine Textvorlage kopierte? –, ist allerdings ebenso unbekannt wie der Titel der Abhandlung; denn den 26 Kolumnen fehlt eine Unter- oder Überschrift. Auch innerhalb des Textes wird kein Titel oder Autor angegeben.

Jahrzehntelanges Puzzlespiel

Noch im Jahr des Fundes hat der deutsche Spezialist Anton Fackelmann den Papyrus Derveni kunstvoll entrollt und damit überhaupt zugänglich gemacht. Allerdings konnte der Text wegen der vielen brand- und altersbedingten Lücken insgesamt nur zu etwa einem Drittel rekonstruiert werden. Zwei Drittel sind wohl für immer zerstört. In den allerersten Kolumnen ist nur ein einzelnes Wort zweifelsfrei entzifferbar.

CLAIRE NIGGLI, ANTIKENMUSEUM BASEL+SAMMLUNG LUDWIG

Orpheus kommt im Papyrus Derveni sehr ausführlich zu Wort. Hier besucht er mit seiner Kithara einen Verstorbenen, der eine Papyrusrolle – vielleicht eine orphische Schrift – in der Hand hält. Die Szene ist auf einer Grab-Amphora aus Süditalien (Apulien) dargestellt.

All dies führte zu einem jahrzehntelangen Puzzlespiel der Wissenschaftler, bei dem fehlende Buchstaben oder ganze Satzteile wort- und sinngemäß ergänzt werden mussten – eine sehr mühevolle Rekonstruktions- und Dechiffrierarbeit, die seit langem Cyriakos Tsantsanoglu in Thessaloniki leistet. Daneben präsentierten in der Vergangenheit immer wieder ausländische Schriftexperten Ergebnisse eigener Rekonstruktionsversuche. Und so streiten die Gelehrten bis heute um

16. EPHOREIA PROISTRIKON KAI KLASIKON ARCHAIOTETON

Diese Fragmente des Papyrus Derveni zeigen eine der am besten erhaltenen Stellen.

▷ Lesarten, Interpretationen und philosophische Vaterschaft des Papyrus Derveni. Die erste komplette Transkription des Urtextes mit englischer Übersetzung veröffentlichte der Londoner Gräzist Richard Janko in der jüngsten Ausgabe der deutschen »Zeitschrift für Papyrologie und Epigrafik« (ZPE Nr. 141), wobei er sie im Vorwort zurückhaltend nur als »Interimstext« bezeichnet.

Im gleichen Fachorgan war bereits im Jahre 1982 eine Version des gesamten bruchstückhaften Urtextes erschienen, allerdings seltsamerweise anonym. Dies weckte großen Unmut in breiten Kreisen der internationalen Gelehrtenwelt, der bis heute noch nicht verflogen ist. Es wird vermutet, dass deutsche Wissenschaftler damals nach Thessaloniki reisten und den dort öffentlich ausgestellten Papyrus hinter Glas fotografierten, um davon zu Hause eine Abschrift anzufertigen. Als unautorisierte Transkription bezeichnete sie die Papyrologin Maria Serena Funghi aus Pisa und sprach damit wohl für viele Kollegen vor allem in den westeuropäischen Ländern. Die Schriftleitung der »Zeitschrift für Papyrologie und Epigrafik« in Bonn reagierte indes nicht auf die Vorwürfe und verwies auf das Vorwort zu dieser Publikation, in dem die Intentionen der deutschen Wissenschaftler dargelegt würden.

Schließlich veröffentlichten auch die Kritiker die Essenz ihrer eigenen Bemühungen um den Papyrus, allerdings erst im Jahre 1997, rund 35 Jahre nach dem Fund. Der amerikanische Sammelband »Studies on the Derveni Papyrus« enthält außer neuen Erkenntnissen über das bedeutende philosophiehistorische Dokument eine frühe englische Übersetzung mitsamt einer Diskussion strittiger Textpassagen. Die Grundlage bildete ein Experten-Kongress, der im April 1993 in Princeton (New Jersey) stattfand. Als Herausgeber fungierten Glenn W. Most von der Universität Chicago (er lehrte von 1991 bis 2001 auch in Heidelberg) sowie André Laks aus Lille (er war letztes Jahr Stipendiat des Berliner Wissenschaftskollegs). Was auffällt: Deutsche Forscher sind in dem Band nicht vertreten und hatten auch nicht auf der Tagung vorgetragen. Als einziger deutschsprachiger Autor lieferte der inzwischen emeritierte Walter Burkert aus Zürich einen Beitrag.

Spiegel vorsokratischen Denkens

Der deutsche Papyrologie-Experte Robert Hübner, bekannt als Schach-Großmeister und Kolumnist, kommentierte diesen Sammelband eher lakonisch mit den Worten: »Da dem Buch der griechische Urtext fehlt, nach dem die Übersetzung angefertigt wurde, hängt es sozusagen in der Luft!« Offensichtlich ist der tiefe Graben zwischen den deutschen und den anderen westlichen Altertumsforschern noch nicht zugeschüttet. Mit besänftigendem Unterton forderte denn auch der Gräzist Claude Calame von der Universität Lausanne kürzlich in einem Pressegespräch seine Kollegen in der Bundesrepublik zu »mehr Kooperationsbereitschaft und Mitarbeit« auf.

Doch jenseits dieses Streits lassen sich durchaus schon einige allgemeine Aussagen zum Papyrus Derveni machen. Eine nüchterne inhaltliche Bestandsaufnahme unter Einbeziehung der jüngst erschienenen Transkription von Janko ergibt, dass der Text um eine Thematik kreist, die dem Tod und der Feuerbestattung eines Kriegers angemessen ist. Die ersten Kolumnen handeln von den Erinnyen, den griechischen Rachegeistern. Heraklit, der namentlich erwähnt wird, nannte sie Helferinnen der Gerechtigkeit. Orpheus, der in späteren Kolumnen zu Wort kommt, möchte sie dagegen durch Opfergaben milder stimmen. Heraklit lehnt dies dem Text zufolge kategorisch ab. Obwohl er als Philosoph des Krieges gilt (»Der Krieg ist der Vater aller Dinge«), verabscheut er insbesondere Blut- oder Tieropfer.

Anschließend erwähnt der Papyrus-Schreiber den Hades und seine Schrecken. Auch dies passt zum Anlass eines Begräbnisses. In der 6. Kolumne folgt die erste komplett erhaltene Textpassage: »Gebete und Opfer besänftigen die Seele...« Hier äußert sich offenbar der Schreiber selbst. Er leitet dann zu Orpheus und seiner Lehre über, der den Menschen »wichtige Dinge in Rätseln«, also verschlüsselt, vermitteln wollte.

Insgesamt spiegelt der Papyrus also zwei wichtige religionsphilosophische Geistesrichtungen seiner Zeit wider – Heraklits vernunftbetontes Denken und die orphische Mystik. Dabei liefert er bedeutsame Einblicke in die vorsokratische Philosophie. Nach Ansicht von Laks bestätigt er in vielen Details die Richtigkeit späterer überlieferter Schriften.

Abgesehen von diesen generellen Aussagen bleiben allerdings gravierende Unterschiede in der Beurteilung durch die diversen Altertumsforscher. So sieht Burkert, der sich seit über zwanzig Jahren mit dem Papyrus befasst, den »sicher belesenen« Autor wenigstens teilweise in der Nachfolge des Stesimbrotos von Thasos – oder gar des Sophisten Anaxagoras. Janko dagegen hält den Papyrus Derveni im Vorwort seiner jüngsten Übersetzung lediglich für eine Abschrift aus den Werken des Diagoras von Melos. Laks schließlich ordnet den Papyrus-Schreiber den Nachfolgern des Diogenes von Apollonia zu. Bei so viel Differenzen selbst im »westeuropäischen« Lager dürfte es noch einige Zeit dauern, bis sich eine einhellige Deutung durchsetzt und eines der wichtigsten Dokumente aus der europäischen Frühzeit richtig in seinen ideengeschichtlichen Kontext eingeordnet ist. ◁

Richard E. Schneider arbeitet als freier Journalist in Tübingen.

Quarksee im Feuerball

Wenn schwere Ionen heftig genug aufeinander prallen, sollten sich die enthaltenen Kernteilchen in ihre Bestandteile – Quarks und Gluonen – auflösen. Die Analyse von Zusammenstößen zwischen Goldatomen lieferte jetzt den bisher überzeugendsten Beleg dafür.

Von Georg Wolschin

Seit mehr als zwei Jahrzehnten suchen Physiker nun schon nach der exotischen Materieform, aus der nach allgemeiner Ansicht das Universum Sekundenbruchteile nach dem Urknall vor 13,7 Milliarden Jahren bestand. Damals herrschten derart hohe Temperaturen, dass Quarks und Gluonen, die sich später zu Protonen und Neutronen – den Grundbestandteilen der Materie – vereinigten, noch frei wie in einer Art See umherschwirrten: dem so genannten Quark-Gluon-Plasma. Diese Schlussfolgerung ergibt sich jedenfalls aus der noch immer gültigen Standardtheorie der Elementarteilchen.

Doch Physiker glauben letztlich nur, was sie im Experiment nachvollziehen können. Deshalb ist die Erzeugung eines Quark-Gluon-Plasmas schon seit langem ein mit großem Nachdruck verfolgtes Ziel an mehreren Teilchenbeschleunigern weltweit. Denn die einzige Chance, diese exotische Materie heute experimentell zu reproduzieren, besteht darin, schwere Atomkerne mit hohen Geschwindigkeiten aufeinander prallen zu lassen.

Allerdings laufen diese Stöße so schnell ab, dass der »Feuerball«, in den sich Teile der kollidierenden Kerne verwandeln, kaum Zeit findet, wenigstens stellenweise jenen thermodynamischen Gleichgewichtszustand anzunehmen, der die Voraussetzung für die Entstehung eines Quark-Gluon-Plasmas ist. Alles in allem sind die Anforderungen beachtlich: Es gilt, in einem mit der Größe des Kerns vergleichbaren Raumbereich für mindestens die Dauer der Wechselwirkungszeit von etwa 10^{-23} Sekunden Temperaturen zu erzeugen, die einige hunderttausendmal höher sind als die etwa 16 Millionen Kelvin im Innern der Sonne, und Energiedichten zu erzielen, welche diejenigen in gewöhnlichen Atomkernen um das Dreißigfache oder mehr übersteigen. ▷

RHIC

Am Schwerionen-Collider RHIC in Brookhaven (New York) werden Goldkerne bei Schwerpunktenergien bis zu 200 Milliarden Elektronenvolt pro Teilchen aufeinander geschossen, um die Bildung von Quark-Gluon-Materie zu untersuchen. Der Beschleunigerring, von dem hier ein kleiner Abschnitt zu sehen ist, hat eine Länge von fast vier Kilometern.

Auf frühe Experimente am Bevalac-Beschleuniger des Lawrence Berkeley Nationallaboratoriums in Kalifornien folgten ab 1994 Versuche mit Bleistrahlen am Super-Protonensynchrotron des europäischen Kernforschungszentrums Cern in Genf. Sie lieferten bereits erste Anzeichen für die Bildung eines Quark-Gluon-Plasmas – beispielsweise eine verringerte Bildungsrate von so genannten J/Psi-Mesonen (Spektrum der Wissenschaft 4/2000, S. 12).

Sehr überzeugend war das allerdings noch nicht. Deshalb begannen im Jahre 2000 am Schwerionen-Collider RHIC des Brookhaven-Nationallaboratoriums in Upton (US-Bundesstaat New York) Experimente mit Goldstrahlen bei noch wesentlich höheren Energien. An diesem Beschleuniger wetteifern seither die vier internationalen Kollaborationen Brahms, Phenix, Phobos und Star um die beweiskräftigsten Resultate. Bei der Analyse ihrer Daten habe ich nun einen relativ überzeugenden Beleg dafür gefunden, dass wirklich vorübergehend ein Quark-Gluon-Plasma entstanden ist.

Was erwarten die Experimentatoren an den Teilchenschleudern? Im Innern der beiden schweren Kerne sollten beim Zusammenprall so hohe Energien und Temperaturen entstehen, dass sich die enthaltenen Protonen und Neutronen auflösen. Dabei würden ihre Bestandteile freigesetzt: je drei Quarks mitsamt den Gluonen, die als »Austauschteilchen« die Wechselwirkung zwischen ihnen vermitteln. Diese könnten dann vorübergehend – wie kurz nach dem Urknall – losgelöst und ungebunden umherschwirren, sich allerdings nicht voneinander entfernen, da ihre gegenseitige Anziehung mit ihrem Abstand zunimmt: Ein Quark-Gluon-Plasma wäre entstanden.

Aufschlussreiche Kollisionsprodukte

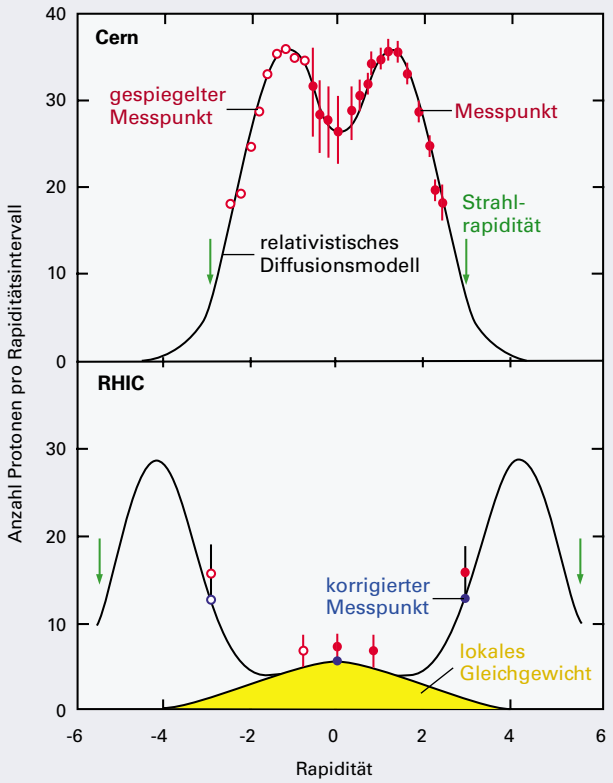
Direkt ist dieser Zustand allerdings nicht nachweisbar: Freie Quarks lassen sich nicht beobachten, sondern vereinigen sich vor jeder direkten Messung mit ihresgleichen zu größeren Teilchen. Das geschieht auch bei den Stoßexperimenten im Teilchenbeschleuniger, während sich der zunächst entstandene heiße, dichte Feuerball ausdehnt und dabei abkühlt. Die Sekundärteilchen stieben dann in verschiedene Richtungen davon. Dabei sollten sie sich in Art, Zahl, Geschwindigkeit und Richtung von denjenigen Kollisionsprodukten unterscheiden, die entstehen, wenn kein Quark-Gluon-Plasma als Zwischenzustand auftritt.

Die Analyse sämtlicher Reaktionsprodukte der Kollision in allen Winkelbereichen ist allerdings extrem aufwendig, wenn nicht unmöglich. Deshalb beschränken sich die Wissenschaftler auf ganz bestimmte Messgrößen, die ihnen besonders aussagekräftig erscheinen. Eine Möglichkeit ist beispielsweise, die »Transversalimpulse« zu analysieren, also die Teilchenimpulse senkrecht zur Strahlrichtung.

Dies haben die vier Kollaborationen am RHIC für die Gold-Gold-Stöße getan. Tatsächlich fand sich dabei im Vergleich zu früheren Daten von Kollisionen zwischen Protonen (unter Berücksichtigung der größeren Teilchenzahl) eine auffällige Abnahme von Partikeln mit hohem Transversalimpuls. Dies lässt sich als Hinweis auf ein Quark-Gluon-Plasma deuten. Ein solches Plasma kann nämlich hochenergetische Quarks, die Rücken an Rücken entstanden sind und in entgegengesetzter Richtung auseinander fliegen, stark abbremsen oder sogar absorbieren, bevor sie einen messbaren Schauer an Sekundärteilchen erzeugen.

Für diese Interpretation spricht auch der Vergleich zwischen Gold-Gold-Stößen und Kollisionen von Gold- mit den wesentlich kleineren Deuterium-Kernen.

Viel sagende Abweichung vom Modell



Die Protonen, die man nach dem Zusammenstoß schwerer Kerne misst, können verraten, ob ein Quark-Gluon-Plasma vorgelegen hat. Ihre Anzahl variiert mit ihrer Rapidität – dem relativistischen Äquivalent der Geschwindigkeit. Diese Variation lässt sich für den üblichen Fall, dass die davonstiebenden Teilchen keine Zeit haben, miteinander ins Gleichgewicht zu kommen, mit dem Relativistischen Diffusionsmodell beschreiben. Ein Beispiel dafür sind die Ergebnisse von Experimenten am Synchrotron SPS des Cern, bei denen Bleikerne aufeinander geschossen wurden (oben). Die Übereinstimmung zwischen Messpunkten (rot) und vorhergesagter Verteilungskurve (schwarz) ist hier sehr gut. Die Stöße zwischen Goldkernen bei höherer Schwerpunkts-Energie am RHIC lieferten jedoch ein anderes Bild (unten). Hier lassen sich die experimentellen Daten im mittleren Rapiditätsbereich nur dann mit der theoretischen Vorhersage in Einklang bringen, wenn ein Teil der Netto-Protonen (Differenz aus Protonen und Antiprotonen) an einzelnen Stellen sprunghaft eine Gleichgewichtsverteilung annimmt (gelbe Fläche). Dies weist darauf hin, dass etwa 14 Prozent der Protonen unmittelbar nach der Kollision kurzzeitig ein Quark-Gluon-Plasma gebildet haben.

RHIC

Mit dem Detektor Brahms *(Broad Range Hadron Magnetic Spectrometer)* – hier ein Blick in die zugehörige Experimentierhalle – werden insbesondere die Verteilungen von Protonen und anderen geladenen Hadronen gemessen, die bei Gold-Gold-Stößen entstehen. Sie erlauben Rückschlüsse auf das kurzfristige Auftreten eines Quark-Gluon-Plasmas.

Im letzteren Fall reicht die Aufprall-Energie nicht aus, die Materie in einem ausgedehnten Raumbereich stark genug aufzuheizen, dass ein Quark-Gluon-Plasma entsteht. Entsprechend findet man keine verringerte Anzahl von Teilchen mit hohem Transversalimpuls. Eine Zusammenfassung dieser Ergebnisse steht in vier Artikeln, die Mitte September bei der Zeitschrift »Physical Review Letters« erschienen sind *(Bd. 91, 072302/3/4/5)*.

Ich selbst habe dagegen »longitudinale« Variable analysiert: die Geschwindigkeitsverteilung der Teilchen in Richtung der Primärstrahlen *(»Physics Letters B«, 4.9.2003, S. 67)*. Dabei verglich ich die experimentellen Daten mit der Vorhersage eines so genannten Relativistischen Diffusionsmodells, das die Nichtgleichgewichts-Situation auf dem Weg hin zum thermodynamischen Gleichgewicht beschreibt. Es wurde von mir entwickelt und von Gruppen in Japan, Italien und Polen aufgegriffen beziehungsweise wenig später unabhängig aufgestellt.

HINWEIS

Im März dieses Jahres berichteten wir über einen Artikel in der Fachzeitschrift »Science«, wonach 3,4-Methylen-dioxy-methamphetamin (MDMA), der Hauptbestandteil der Designerdroge Ecstasy, angeblich Dopamin-Neuronen im Gehirn zerstört und damit eine Parkinson-Erkrankung auslösen kann. Dieser Artikel wurde nun von seinen Autoren zurückgezogen. Nachträglich hat sich herausgestellt, dass wegen eines vertauschten Etiketts auf den Substanzbehältern Methamphetamin (»Speed«) statt MDMA für die Untersuchungen verwendet worden war. Diese Substanz kommt aber in Ecstasy nicht vor. Außerdem ist schon lange bekannt, dass sie Dopamin-Neuronen schädigt.

Eine wahre Teilchenflut

An der Kollision zwischen zwei Gold-Kernen sind sehr viele Teilchen beteiligt. Zum einen enthält Gold selbst bereits 79 Protonen und 118 Neutronen. Zum anderen materialisiert sich die enorme Aufprall-Energie gemäß der Energie-Masse-Äquivalenz der Relativitätstheorie in zahllosen Quarks und Gluonen, die sich schließlich zu etwa 4500 neuen geladenen und vielen weiteren neutralen Partikeln vereinigen. Daher verzichtet das Relativistische Diffusionsmodell darauf, das individuelle Verhalten jedes einzelnen Teilchens beschreiben zu wollen, und liefert stattdessen Mittelwerte und Schwankungsbreiten für die Merkmale aller Teilchen einer bestimmten Sorte.

Meiner theoretischen Analyse lagen Daten der Brahms-Kollaboration zu Grunde. Sie beziehen sich auf die Anzahl der beim Stoß erzeugten Netto-Protonen (Differenz zwischen Protonen und Antiprotonen) als Funktion der Geschwindigkeit oder genauer der Rapidität, die bei fast lichtschnellen Teilchen, die relativistische Effekte zeigen, die geeignetere Messgröße ist.

Relativ dicht bei den Geschwindigkeitswerten der beiden aufeinander treffenden Goldstrahlen erreicht die Anzahl der Netto-Protonen jeweils ein Maximum. Das Relativistische Diffusionsmodell beschreibt die Lage der Maxima, und wie sie sich auf Grund von Diffusionsprozessen durch Wechselwirkung mit anderen Teilchen und durch das Erzeugen neuer Partikel verbreitern. Bei der vergleichsweise niedrigen Energie der Experimente mit Blei-Kernen am Cern von ungefähr 17 Milliarden Elektronenvolt Schwerpunktsenergie pro Teilchen gibt es die Daten sehr gut wieder. Hinweise auf Quark-Gluon Materie sind dort demnach nicht zu erkennen.

Bei der höheren RHIC-Energie von 200 Milliarden Elektronenvolt pro Teilchen dagegen verhält es sich anders. Hier liegen die Messpunkte bei relativ langsam in Strahlrichtung bewegten Teilchen deutlich über den Werten, die das Relativistische Diffusionsmodell für den Nichtgleichgewichtsfall vorhersagt. Das lässt sich nur erklären, wenn man annimmt, dass etwa 14 Prozent der Teilchen in der extrem kurzen Wechselwirkungszeit von etwa 10^{-23} Sekunden ein lokales thermodynamisches Gleichgewicht erreichen. Die plötzliche Zustandsänderung ist dabei typisch für einen Phasenübergang: Analog geht Eis zum Beispiel am Schmelzpunkt abrupt vom festen in den flüssigen Zustand über.

Das Ergebnis für zentrale Gold-Gold-Stöße lässt sich demnach als vorübergehende lokale Bildung eines Quark-Gluon-Plasmas interpretieren. Noch direktere Anzeichen für den Übergang in diesen exotischen Materiezustand dürften sich nur schwer finden lassen. Ihn genauer zu untersuchen, wird nun die wesentliche Aufgabe der weiteren Experimente am Schwerionen-Collider RHIC und ab 2007 am Large Hadron Collider LHC des Cern sein.

Georg Wolschin lehrt an der Universität Heidelberg Theoretische Physik und ist Wissenschaftsjournalist.

Warum Ordnung keinen Sinn mehr macht

Ich gebe es zu: Ich bin ein manischer Jäger und Sammler von Informationen. Bis heute habe ich keine einzige Fotokopie eines Fachartikels weggeworfen. Aber meine Sammelwut geht viel weiter: Meine Archive enthalten auch Artikel über die ehemalige Konzertpianistin, die 20 Jahre in einem Autowrack in einem Londoner Villenviertel lebte, bis es die Nachbarn verschrotten ließen. Ferner horte ich Berichte über naturkundliche Kuriositäten sowie Theater- und Konzertprogramme. Hinzu kommen Kritiken von Filmen, die ich gesehen habe. Und alle Spektrum-Hefte seit 1985 in Jahrgangsboxen.

Bis vor kurzem waren diese Informationsschätze in einem voluminösen, sinnreich geordneten Archiv aus Dutzenden von Pappkartons, Stehsammlern, Hängeordnern und Ringbüchern relativ leicht auffindbar. Nach mehreren Büroumzügen ist dieses System jetzt allerdings ein wenig durchgeschüttelt. Und ich fürchte, es wird seine glorreichen Tage nie wieder sehen. Denn vor einigen Monaten fiel es mir wie Schuppen von den Augen: Dank der Suchmaschine Google hat das Ordnen von Informationen grundsätzlich jeden Sinn verloren. »Wer Ordnung hält, ist nur zu faul zum Suchen«, sagte meine selige Großtante immer. Dabei konnte sie nicht ahnen, dass der zum Suchen nötige Aufwand eines Tages gegen null gehen würde.

Noch vor gut fünf Jahren waren Internet-Recherchen tatsächlich mühselig. Man hatte die Wahl zwischen Suchmaschinen, die einen mit nutzlosen Ergebnissen überschütteten, und endlosen Verzeichnissen, die nach Kategorien geordnet waren und wie die gelben Seiten funktionierten: Region / Dienstleistungen / Klempner – Heureka! In jener finsteren Zeit lohnte es sich noch, öffentlich zugängliche Informationen für den Hausgebrauch zusammenzustellen und nach einem durchdachten System zu archivieren. Ich hatte auf meiner Website ein Verzeichnis von Hunderten von Weblinks, wohlsortiert nach Kategorien und Unterkategorien.

Heute benutze ich es kaum noch, weil es viel zu viel Arbeit wäre, es auf dem neuesten Stand zu halten, und weil ich die Links über Google mindestens genauso schnell finde. Vom »Guardian« zu einem der sieben Weltwunder des Internets erklärt, erkundet die aus einem Forschungsprojekt an der Stanford-Universität hervorgegangene Suchmaschine nicht nur, welche Informationen die einzelnen Websites anbieten, sondern auch, wie relevant sie für andere sind. Damit gelingt, was wie Hexerei anmutet: Die gewünschte Verbindung taucht praktisch immer ganz vorne in der Liste auf.

Die Folgen sind revolutionär: Wir haben den Punkt erreicht, wo das geordnete Archivieren öffentlich zugänglicher Information unnütz geworden ist. Mich trifft das schwer. Meine gesammelten Zeitungsausschnitte sind Makulatur. Die meisten stammen aus dem »Guardian«, und der unterhält eines der besten Zeitungsarchive auf dem Netz. Da finde ich Artikel, an die ich mich dunkel erinnere, leichter als in meinen Pappkartons. Informationen über Bücher und Filme braucht man ebenso wenig aufzuheben – Amazon und die Internet Movie Database erledigen das.

Aber was mache ich nun mit meinen ehemals wertvollen, hochgradig geordneten Informationen? Einfach wegwerfen? Das bringe ich nicht über mich. Bedenken Sie nur, um wie viel das die Entropie des Universums unwiederbringlich erhöhen würde! Derzeit erprobe ich ein neues, vereinfachtes Ordnungsschema mit nur drei Kategorien, bei dem ich die Papiere einfach chronologisch staple. Ab und zu, wenn ich auf der Suche nach einem Glossenthema bin, stöbere ich so einen Stapel durch. Und wenn Einsturzgefahr droht, kann ich jeweils den untersten Meter zusammenschnüren und zum Altpapier geben. Oder vielleicht doch auf dem Dachboden lagern? Man kann ja nie wissen ...

Michael Groß
www.proseandpassion.com

Im November bei wissenschaft-online

wissenschaft-online

Morbus Pompe heißt ein seltenes Stoffwechselleiden. Damit die Erforschung solcher Krankheiten auch wirtschaftlich interessant ist, muss der Gesetzgeber Anreize schaffen. Im Fall von Morbus Pompe mit Erfolg: Erste klinische Studien zu einer Therapie verliefen erfolgreich. Mehr dazu finden Sie im November unter www.wissenschaft-online.de/medizin

Sehr nah dran an den ersten Schritten hin zu einem marktfähigen Medikament ist seit 1823 die Fachzeitschrift The Lancet – traditionell in englischer Sprache. Seit neuestem gibt es ein deutschsprachiges Internetangebot, dass Ihnen in Zusammenarbeit mit wissenschaft-online wöchentlich Artikel aus The Lancet vorstellt: www.thelancet.de

»**Die Menschen** kennen Dolly, aber nicht mich«, meint Ian Wilmut. In der Tat ist das Klonschaf weit berühmter als sein Schöpfer. wissenschaft-online sprach mit Ian Wilmut über das Klonen und die Ängste, die diese Technik auslöst. Sie finden dieses und weitere interessante Interviews unter: www.wissenschaft-online.de/interviews

www.wissenschaft-online.de

INTERVIEW

Insgesamt läuft viel zu wenig

Leibniz-Präsident Hans-Olaf Henkel über die Bedeutung von Innovation für die Volkswirtschaft und über Strukturschwächen im nationalen Wissenschaftsbetrieb

Herr Professor Henkel – wie steht es um die Innovationsleistung der Deutschen?
Die deutsche Wirtschaft ist nach wie vor sehr produktiv. Allerdings leben wir zunehmend auf Pump vergangener Erfolge. In den zukunftsweisenden Branchen – der Informations- und Telekommunikationstechnologie etwa – spielt die Musik heute leider woanders.

Es gibt doch sehr erfolgreiche deutsche Firmen in diesen Märkten.
Sicher – einige wenige Leuchttürme: SAP zum Beispiel, das weltweit bedeutendste Anwendungssoftwarehaus, oder die sehr erfolgreiche Mobilfunksparte von Siemens. Insgesamt läuft hier zu Lande aber viel zu wenig. Ausländische Unternehmen entwickeln – und verdienen – weit mehr als wir. Das meiste Wissen wird importiert.

Liegt das auch daran, dass wir zu wenige qualifizierte Fachkräfte haben, die für mehr Innovation sorgen könnten?
Ohne Frage haben wir ein Bildungsproblem, schon in den Schulen. Eine Konsequenz aus dem schlechten Abschneiden deutscher Schüler bei der Pisa-Studie müsste zum Beispiel sein, dass man die so genannten harten Fächer – vor allem Mathematik – in der Oberstufe nicht mehr abwählen darf. Wir brauchen mehr naturwissenschaftlichen Unterricht an den Schulen, weil wir auch mehr Universitätsabsolventen in diesen Schlüsselfächern benötigen.

Gibt es so etwas wie eine nationale Innovationsbilanz?
Oft wird die Handelsbilanz als solche verkauft. Doch das ist unzulässig, denn sie enthält nur den Vergleich von eingeführten und ausgeführten Waren. Natürlich ist es schön, wenn wir da noch immer Export-Vizeweltmeister sind. Aber das ist kein Beweis für internationale Konkurrenzfähigkeit.

Was nehmen Sie als Messlatte?
Die Leistungsbilanz. Diese enthält neben den Gütern auch die Dienstleistungen und Kapitalanlagen sowie sämtliche invisiblen Faktoren: Patente, Lizenzen und Copyrights. Erst wenn Sie das alles zusammennehmen, bekommen Sie wirklich einen Überblick darüber, was Deutschland leistet – oder besser gesagt: was es

Nur die Forschung hat in Deutschland keine Stimme

sich leistet. Denn in den letzten elf Jahren war die Gesamtbilanz nur ein einziges Mal positiv! Bitte verstehen Sie mich richtig: Natürlich ist Deutschland beispielsweise im Automobilbau nach wie vor führend in der Welt; wir produzieren ganz ausgezeichnete Fahrzeuge. Aber bei den Innovationen im Hightech-Bereich sieht das Bild völlig anders aus. Da werden wir international abgehängt.

Für welche Zukunftsmärkte gilt das noch?
Für die Biotechnologie zum Beispiel. Nehmen Sie etwa die so genannte grüne Gentechnik, eine fantastische Zukunftsbranche. Heute wollen weltweit 6,6 Milliarden Menschen ernährt werden – und dabei möglichst gesund leben. Aber in Deutschland meinen wir, die Forschung in diesem wichtigen Bereich einstellen zu müssen, weil sie angeblich moralisch nicht verantwortbar ist. Ich halte diese Einstellung für zynisch: Wie will man die Menschenmassen denn ohne diese Fortschritte ernähren?

Manche deutsche Biotech-Unternehmen lassen im Ausland forschen.
Traurig, aber wahr. Neue Forschungsstandorte werden erst gar nicht in Deutschland errichtet – und das gilt auch für andere Branchen. Zwar sind unsere Top-Unternehmen auch weltweit betrachtet absolut Spitze, keine Frage – aber nur weil sie kaum noch in Deutschland entwickeln lassen.

Das können sie aber nicht allein auf die Vorbehalte gegen einige ganz bestimmte Forschungsvorhaben schieben.
Natürlich nicht. Wir haben auch viel zu hohe Arbeitskosten. Ein Forschungsplatz kostet in Deutschland etwa 800 000 Euro – und der Wissenschaftler hat dann eine offizielle Wochenarbeitszeit von 35 Stunden. Das ist lachhaft im internationalen Vergleich. Nach Tarif arbeitet ein deutscher Arbeitnehmer 1560 Stunden

PETER HIMSEL / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Hans-Olaf Henkel

- Jahrgang 1940
- 1962–1994 Industrielaufbahn bei IBM, zuletzt Präsident der IBM-Europazentrale
- 1995–2000 Präsident des Bundesverbandes der deutschen Industrie (BDI)
- seit 2001 Honorarprofessor für Betriebswirtschaftslehre an der Universität Mannheim sowie Präsident der Wissenschaftsgemeinschaft Gottfried Wilhelm Leibniz

im Jahr, ein Japaner dagegen 1900 und ein Amerikaner sogar 2000. Klar, dass die deutsche Industrie auch vor diesem Hintergrund wie ein Weltmeister im Ausland investiert – und gut damit fährt. Aber was die Aktionäre freut, muss alle diejenigen aufschrecken, die sich verantwortlich fühlen für unser Land.

Welche Personen sind für das Innovationsgeschehen in den Unternehmen ausschlaggebend?

Die Chefs. Ein Vorstandsvorsitzender muss das langfristige Wohlergehen seines Unternehmens im Blick haben. Vereinfacht ausgedrückt, bringt die Anwendungsforschung in seinem Haus die Produkte von morgen hervor und die Grundlagenforschung die von übermorgen. In der Pharmabranche beispielsweise brauchen Sie zehn Jahre, bis ein neues Medikament auf den Markt kommt. Sie müssen also stets dafür sorgen, dass die Pipeline neuer Ideen und Entwicklungen gefüllt bleibt. Wer allerdings als Firmenchef ähnlich wie die Politiker einfach mal schnell das Budget für die Forschungsabteilung herunterfährt, sobald ein Quartalsergebnis schlecht ausfällt, der versündigt sich an seinem Unternehmen.

Erklärt sich so ein Verhalten nicht aus den Zwängen unseres Wirtschaftssystems?

Das ist richtig. Die Marktwirtschaft offenbart an diesem Punkt entscheidende Schwächen gegenüber einer Planwirtschaft. Die Unternehmenschefs müssen hier und jetzt für ihre Bilanzen gerade stehen. Und genau aus diesem Grund ist der Staat entscheidend mitverantwortlich für die Forschungsförderung – speziell bei der Grundlagenforschung.

Sind öffentliche Forschungsgelder nicht so etwas wie verdeckte Subventionsleistungen an Großkonzerne?

Nein. Die Ausschüttung dieser Mittel ist eine notwendige Korrektur eben jenes Nachteils unseres relativ kurzfristig reagierenden Wirtschaftssystems.

Im Moment sieht es nicht so aus, als würde die Politik ihrer Pflicht nachkommen.

Nur sehr unzureichend. Der Anteil der Aufwendungen des Staates für Forschung und Entwicklung ist im Vergleich zu dem der Wirtschaft in den letzten Jahren dramatisch gesunken. Deutschland gibt heute 2,5 Prozent seines Bruttoinlandsprodukts für F&E aus; davon kommt nur noch ein Drittel vom Staat. Und da die Privatwirtschaft naturgemäß hauptsächlich Anwendungsforschung betreibt, gehen die Kürzungen der öffentlichen Gelder fast ausschließlich auf Kosten der Grundlagenforschung – was einem Raubbau an unserer Zukunft gleichkommt.

Erklärtes Ziel der Bundesregierung ist eine Erhöhung der Gesamtquote auf drei Prozent bis zum Jahr 2010.

Ein hehres Ziel. Aber wenn das so weitergeht, wird dieses Versprechen garantiert dasselbe Schicksal erleiden wie die immer wieder in Aussicht gestellte Hebung der Entwicklungshilfe-Quote auf 0,7 Prozent. Deren Anteil liegt jedoch nach wie vor bei unverantwortlich mageren 0,3 Prozent.

Brauchen Wissenschaft und Forschung ein Gesicht, um ihre Interessen gegenüber der Politik besser vertreten zu können?

Das wäre in der Tat sehr hilfreich: Wir haben in Deutschland den ADAC, der sich für die Belange der Autofahrer einsetzt; wir haben einen BDI-Präsidenten, der die Wirtschaft in der Öffentlichkeit vertritt, und einen DGB-Vorsitzenden, der die Interessen der Gewerkschaftler artikuliert. Nur die Forschung hat keine Stimme. Oder anders formuliert: Die Bundesforschungsministerin hat keinen Gesprächspartner auf Augenhöhe als Gegengewicht.

Was wäre aus Ihrer Sicht die Lösung – vielleicht die Einrichtung einer deutschen Nationalakademie für Forschung und Wissenschaft, mit einem starken Präsidenten an der Spitze?

So weit müssen wir gar nicht gehen. Es gibt ja bereits die so genannte Allianz: den Zusammenschluss von Deutscher Forschungsgemeinschaft, Max-Planck-Gesellschaft, Fraunhofer-Gesellschaft, Hochschulrektorenkonferenz, Wissenschaftsrat und Leibniz-Gemeinschaft. Deren Präsidenten könnten zusammen mit einer überschaubaren Anzahl hochrangiger Forscherpersönlichkeiten ein Gremium bilden, das sich für drei oder vier Jahre einen Vorsitzenden wählt und die Belange der Wissenschaft so formuliert, dass die Politik nicht mehr daran vorbeikommt. ◁

Das Interview führte **Carsten Könneker**.

KÜNSTLICHE INTELLIGENZ

Poststelle mit Pfiff

Viele Unternehmen drohen in einer nicht enden wollenden Flut eintreffender E-Mails zu ertrinken. Den Weg aus dem Chaos weisen intelligente Software-Systeme.

E-Mails sind super. Schnell, zuverlässig und praktisch kostenlos. Kein Wunder, dass sich ihre Zahl derzeit Jahr für Jahr verdoppelt. Experten zufolge sollen 2005 weltweit täglich 36 Milliarden Elektropostillen durchs Netz huschen.

Auch im Geschäftsleben wird immer häufiger per E-Mail kommuniziert. Doch viele Firmen sind nur unzureichend auf das neue Medium vorbereitet. Das Hamburger Marktforschungsinstitut M & Oh Research Services entlarvte Deutschland bei einem Test als E-Mail-Dienstleistungswüste: Von hundert Service-Anfragen an die größten deutschen Unternehmen, gesendet von Testpersonen mit E-Mail-Konten bei Gratis-Providern, wurden selbst bei zweiter Mahnung neun überhaupt nicht beantwortet. Und nur knapp der Hälfte der Firmen gelang es, das geschilderte Kundenproblem auf elektronischem Postweg zu klären. 41 Prozent verwiesen schnöde auf ihre Filialen oder Händler vor Ort.

»Es ist kein Zufall, dass man auf den Webseiten vieler Unternehmen die E-Mail-Adresse kaum findet«, urteilt Klaus Netter, Mitgründer und Geschäftsleitungsmitglied der auf intelligente E-Mail-Systeme spezialisierten Saarbrücker Software-Schmiede XtraMind. Die Firmen versuchen so, Probleme bei der Beantwortung von Kunden-E-Mails gar nicht erst aufkommen zu lassen. Nur die wenigsten verfügen über eigenständige »elektronische Poststellen«. Meist werden die E-Mails lieblos und nebenbei von eigentlich für Telefonanrufe zuständigen Callcenter-Mitarbeitern beantwortet – und oft auch einfach gelöscht.

Dauerhafte Archivierung

Solche Unzuverlässigkeiten frustrieren die Absender. Im Zeitalter des E-Commerce, findet Netter, sollten Firmen ihre elektronische Post genauso ernst nehmen wie herkömmliche Geschäftsbriefe: »Deshalb ist es ein wesentliches Kennzeichen des von uns entwickelten Systems, dass E-Mails nicht mehr willkürlich gelöscht werden können.« Stattdessen werden sie mit allen Antworten und Rückfragen samt Datum, Uhrzeit und Namen des Sachbearbeiters protokolliert und dauerhaft elektronisch archiviert. So sind sie noch Jahre später abrufbar. »In den USA ist die E-Mail-Archivierung bereits gesetzlich vorgeschrieben«, erläutert Netter.

Der eigentliche Clou des XtraMind-Systems ist seine Künstliche Intelligenz. Dank aufwendiger linguistischer Analysemethoden ist XM-MailMinder – so der offizielle Name der Programms – in der Lage, eingehende E-Mails inhaltlich zu »verstehen«. Das heißt, das System kann bestimmen, worum es dem Schreiber geht. Dadurch lassen sich Spam-E-Mails identifizieren und herausfiltern. Und die verbliebene relevante Elektropost wird vollautomatisch an den jeweils zuständigen Mitarbeiter weitergeleitet. Doch damit nicht genug: XM-MailMinder erzeugt sogar aus vorgefertigten Textbausteinen eine mögliche Antwort, die in rund neunzig Prozent der Fälle auch sinnvoll und brauchbar ist. Der Sachbearbeiter muss sie nur kurz auf Stichhaltigkeit checken – und schon kann er sie an den Kunden schicken.

Die Firmen sparen mit XM-MailMinder trotz des stolzen Preises von 50 000 Euro (für eine größere Installation) eine Menge Geld. Denn mit dem System ausgestattet, können Mitarbeiter bis zu viermal mehr E-Mails beantworten. Das steigert die Effizienz. Kein Wunder, dass XtraMind heute, nur drei Jahre nach der Gründung, zum deutschen Marktführer im Bereich E-Mail-Response-Management (ERM) arrivierte. Zu den Kunden zählen Unternehmen wie 1&1, Blaupunkt, Deutsche Bahn Dialog, GMX, Quelle, bon prix (Otto Versand) sowie die Pro7Sat.1 Media AG.

Dabei begann die Erfolgsstory des Start-up-Unternehmens recht unspektakulär. Kein zündender Geistesblitz im Bierkeller lieferte den Anstoß, sondern kühle Marktanalyse, gepaart mit hochkarätigem Know-how. Die Gründungspartner haben einen wissenschaftlichen Hintergrund in Künstlicher Intelligenz (KI) und Sprachtechnologie: Netter befasste sich bereits Mitte der 1980er Jahre an der Universität Stuttgart mit maschineller Sprachverarbeitung. Am 1988 gegründeten Deutschen Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI) in Saarbrücken widmete er sich der angewandten KI-Forschung, zuletzt als stellvertretender Forschungsbereichsleiter für Sprachtechnologie.

Der aus Mali stammende Technologieleiter (CTO) Abdel Kader Diagne ist Spezialist für Künstliche Intelligenz, Software-Engineering und Objektorien-

STECKBRIEF

XtraMind Technologies GmbH

- Ort: Saarbrücken und Hamburg
- Gegründet: 2000
- Mitarbeiter: 52
- Produktidee: automatisierte und optimierte E-Mail-Bearbeitung
- Wissenschaftlicher Hintergrund: Sprachtechnologie, Künstliche Intelligenz
- Kooperation: Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz, Saarbrücken

Wenn clevere E-Mail-Managementprogramme in Kundenservicecentern Einzug halten, könnten die Bilder kapitulierender Mitarbeiter bald der Vergangenheit angehören.

IFA-BILDERTEAM

tierte Systeme. Hans Uskoreit, ebenfalls Sprachtechnologie-Spezialist, ist Professor für Computerlinguistik an der Universität des Saarlandes und Wissenschaftlicher Direktor am DFKI. Das Forschungszentrum selbst ist weiterer Gründungspartner und beteiligte sich damit zum ersten Mal direkt an einem Spin-off-Unternehmen.

Der Bedarf für intelligentes E-Mail-Management zeigte sich bereits vor fast zehn Jahren, als E-Mails mit zunehmender Nutzung des Internets ihren weltweiten Siegeszug antraten. »Das Saarbrücker Callcenter von AOL Europe wurde nach einer erfolgreichen Boris-Becker-Werbekampagne mit E-Mails geradezu überschüttet«, erinnert sich Netter. Es gab »Zulauf ohne Ende« und entsprechend lange Bearbeitungszeiten. Den AOL-Verantwortlichen wurde klar, dass sie der E-Mail-Flut mit herkömmlichen Methoden kaum mehr Herr werden konnten. Netter und seine DFKI-Kollegen fanden die Lösung innerhalb eines Forschungsprojekts: Mit dem Prototyp eines KI-basierten E-Mail-Management-Systems konnten die Callcenter-Mitarbeiter E-Mails prompt doppelt so schnell beantworten wie vorher.

Flapsigkeit als Herausforderung

Das Start-up-Unternehmen XtraMind erblickte aber erst im August 2000 das Licht der Welt – um dann jedoch umgehend zum technologischen Marktführer zu avancieren. Hier zahlte sich die langjährige Forschungsarbeit am DFKI aus, in der unter anderem »Verbmobil« entstanden war – ein Übersetzungssystem, das gesprochene Sprache inhaltlich erfasst. Die semantische Analyse von E-Mails ist sogar noch etwas einfacher, da der »Input« in Form von Schriftsprache vorliegt – während bei der Spracherkennung Nuscheln oder Geräusper regelmäßig zu Verständnisproblemen führen. Allerdings haben auch E-Mails ihre Tücken: Sie sind meist kurz, flapsig formuliert und häufig voller Rechtschreibfehler. Ein System, das daraus schlau wird und die Elektropost erfolgreich kategorisieren kann, darf daher mit Recht als intelligent gelten. Im Frühjahr 2002 brachte XtraMind die erste Version der Software auf den Markt – und vollbrachte das für eine kleine Technologie-Firma bemerkenswerte Kunststück, bereits sechs Monate später eine gute Million Euro Umsatz eingefahren zu haben.

Bis heute schwoll die komplexe Software auf über 400 000 Zeilen Code an – und bietet nun vieles, was der Prototyp noch schmerzlich vermissen ließ: Eine intuitive, nach Kundenaussagen selbst »von angelernten Studenten« innerhalb einer Viertelstunde zu verstehende Bedieneroberfläche, ausgefeilte Möglichkeiten zur Steuerung des Arbeitsablaufs und der Geschäftsprozesse, Datenbank-Anbindungen, Kundenverwaltung und vieles mehr. All dies habe mit Künstlicher Intelligenz eigentlich nur wenig zu tun, meint Netter, sei aber für den Erfolg unverzichtbar.

Für die Zukunft haben sich die XtraMind-Tüftler weitere bahnbrechende Neuerungen vorgenommen: Kommende Programmversionen machen das gesamte Firmenwissen per Mausklick abfragbar, unter anderem durch eine intelligente Erweiterung von E-Mail-Programmen wie Microsoft Outlook oder Lotus Notes. Durch Anzapfen dieses Wissenspools könnten Sachbearbeiter ihre E-Mails dann noch schneller – und vor allem wesentlich kompetenter – beantworten.

Auch der Firmenexpansion ins Ausland stehen technologisch keine unüberwindlichen Hürden im Weg. Die linguistischen Teile des Analyse-Moduls sind zwar sprachspezifisch – zurzeit gibt es Versionen unter anderem in Deutsch, Englisch und Französisch. Die lernfähige KI-Komponente hingegen, die unter anderem für die E-Mail-Klassifikation und -Weiterleitung sowie für die Antwortvorschläge zuständig ist, wurde bereits erfolgreich in den unterschiedlichsten Sprachen getestet – sogar in Afrikaans, Arabisch, Persisch und Koreanisch. ◁

Claus-Peter Sesín

Der Autor ist freier Wissenschaftsjournalist in Hamburg und auf KI-Themen spezialisiert.

KOMMENTAR

Den Wandel gestalten

Unsere Gesellschaft ist nach wie vor bewegungsfähig. Vor allem Stiftungen fördern Initiative – als »Motoren des Wandels«.

VOLKSWAGENSTIFTUNG

Wilhelm Krull

Die wirtschaftlichen, politischen und sozialen Randbedingungen unseres Handelns wandeln sich derzeit grundlegend. Angesichts der hohen Veränderungsdynamik wird immer deutlicher, dass der Versuch, an Althergebrachtem festzuhalten, nicht weiterhilft. Oder zugespitzt formuliert: Jene, die wollen, dass die Welt bleibt, wie sie ist, wollen offenbar nicht, dass sie bleibt.

Die globalen ökonomischen und ökologischen Herausforderungen werden uns täglich in den Nachrichten vor Augen geführt. Doch müssen wir nicht minder dringend vor der eigenen Haustür kehren: die brennenden sozialen und gesundheitspolitischen Probleme angehen, lange versäumte Reformschritte endlich tun und die Wettbewerbschancen deutscher Unternehmen stärken.

Mit anderen Worten: Innovatives Denken und Handeln sind gefordert. Neue Ideen, kreative Vorschläge und die Bereitschaft, diese auch in die Tat umzusetzen, benötigt Deutschland mehr als je zuvor. Den »Reformstau« und die »Innovationsblockaden« lediglich lauthals zu beklagen hilft nicht weiter. Auf dem Weg hin zu positiven Veränderungen müssen wir Taten sprechen lassen. Oder fallen Erneuerungsvorschläge und Risikobereitschaft am Ende bereits heute der bleiernen Nostalgie einer stetig alternden Gesellschaft zum Opfer? Ich glaube das nicht! Denn die allgemein diagnostizierte Lethargie ist zu einem guten Teil lediglich herbeigeredet.

Ein Blick unter die medial vermittelte Oberfläche – hinein in die vielen Reformwerkstätten und Innovationsagenturen – zeigt, dass es im Kleinen längst vorwärts geht. Dabei sind es nicht zuletzt Einzelinitiativen, die in Schulen, Hochschulen und Forschungslabors, aber auch in vielen anderen sozialen Handlungsfeldern und Institutionen positive Veränderungen herbeiführen.

Vielseitige Vorreiter

So agieren speziell Stiftungen als »Motoren des Wandels«, wie Alt-Bundespräsident Roman Herzog es ausdrückte – indem sie Impulse geben für das Aufgreifen neuer Themen, das Ausprobieren alternativer Wege oder das Implementieren effizienterer Managementformen.

Viele Reformschritte in der Hochschul- und Forschungspolitik der vergangenen Jahre sind zuerst von Stiftungen gefördert worden. Dazu gehören zum Beispiel die Doktorandenausbildung in Graduiertenkollegs, die fachübergreifende Zusammenarbeit in universitären Forschungszentren und die Chance für den begabtesten wissenschaftlichen Nachwuchs zu frühzeitiger selbstständiger Forschungsarbeit. Indem Stiftungen gemeinsam mit ihren Partnern in den Hochschulen zeigen, dass es auch hier zu Lande sehr wohl möglich ist, aktiv Veränderungen zu gestalten, bahnen sie großflächigeren Strukturreformen den Weg.

Hier müssen wir weiter voranschreiten – nicht zuletzt durch neue Stiftungsgründungen oder Zustiftungen, mit denen zusätzliche Kapitalerträge für dringend notwendige Innovationen mobilisiert und dauerhaft eingesetzt werden können. Gerade die Vielfalt und Flexibilität von Stiftungen, aber auch die – vor allem ihrer wirtschaftlichen Unabhängigkeit zu verdankende – Schnelligkeit und Risikobereitschaft müssen künftig noch intensiver genutzt werden, um neues Wissen hervorzubringen und in die jeweiligen Handlungsfelder zu transferieren.

Dabei sollten wir stets im Blick behalten, dass die erfolgreichste Form des Wissens- und Innovationstransfers die Ausbildung von hervorragend qualifizierten Nachwuchskräften ist – die später leitende Funktionen in Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft übernehmen. Gerade diesem Personenkreis müssen wir vielfältige Möglichkeiten schaffen, neue Ideen in die Tat umzusetzen – damit die Welt so wird, dass sie bleiben kann. ◁

Wilhelm Krull

Der Autor ist Vorstandsmitglied des Bundesverbandes Deutscher Stiftungen und Generalsekretär der VolkswagenStiftung.

PHARMAKOLOGIE

24 Stunden über Normalnull

Im Jahr 2025 wird es weltweit mehr als 300 Millionen Diabetes-Patienten geben – doppelt so viele wie heute. Um den steigenden Bedarf an Insulin zu decken, setzt Aventis konsequent auf Biotechnologie.

AVENTIS

Die Qualität von abgefüllten Insulin-Fläschchen, so genannter Vials, wird unter anderem per Hand in einem Reinraum überprüft.

Der Boden unter seinen Füßen scheint zu wanken, ihm schwindelt und es plagt ihn ein unstillbarer Durst. Sein Körper, fast bis zum Skelett abgemagert, wirkt schwach und hilflos. Die Symptome lassen keinen Zweifel zu: Leonard Thompson hat nur noch wenige Wochen zu leben. Doch das Blatt wendet sich. Durch Injektion eines neuen medizinischen Präparats wird das Leben des 14-jährigen Jungen gerettet.

Dieser historische Heilungserfolg ereignete sich in den zwanziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts und markierte eine bahnbrechende wissenschaftliche Entdeckung: Zum ersten Mal hatten Ärzte Diabetes erfolgreich pharmakologisch therapiert. Der lang ersehnte Durchbruch bei der Behandlung der bis dahin stets tödlich verlaufenden Stoffwechselkrankheit beruhte auf den Versuchen des Mediziners Frederick G. Banting, seines Studenten Charles H. Best sowie des Biochemikers James B. Collip. Das kanadische Forschertrio hatte einem Hund die Bauchspeicheldrüse entfernt und daraus ein später Insulin genanntes Extrakt gewonnen. Bis ins ferne Deutschland beflügelte diese Entdeckung die Forscher. Bereits ein Jahr später brachte die Frankfurter Firma Hoechst das Insulin in den Handel.

Dasselbe Unternehmen, mittlerweile in Aventis umbenannt, rund achtzig Jahre später: Verborgen in einem großen Gebäudekomplex absolviert derzeit die weltweit modernste Anlage zur biotechnologischen Produktion von Insulin ihren Probelauf. Anfang 2004 soll dort der Startschuss für die Herstellung eines neuartigen Insulins fallen. Ein Besuch der Hightech-Anlage verläuft spektakulär: Menschenleere, blankpolierte Flure lassen zunächst nichts Ungewöhnliches vermuten. Öffnet sich aber eine bestimmte Tür, blickt man in einen Raum, der wie die Kommandozentrale eines Raumschiffs anmutet. Über Computerbildschirme huschen zahllose bunte ▷

▷ Verbindungslinien, die den unbedarften Betrachter entfernt an einen U-Bahn-Plan erinnern, doch in Wirklichkeit das Steuernetz der gentechnischen Produktion eines völlig neuartigen Insulins darstellen.

Flüchtige Substanz

Bei der industriellen Herstellung von Insulin hatten Wissenschaftler von Beginn an hohe Hürden zu nehmen. Zwischenzeitlich nutzte man Bauchspeicheldrüsen von Schweinen und Rindern, um das lebensrettende Extrakt zu gewinnen. Doch wie eine kapriziöse Diva, die nicht ausreichend hofiert wird, machte sich das kostbare Elixier spurlos aus dem Staub, sobald es nicht ausreichend gehegt und gepflegt wurde.

Im Laufe der Jahre konnte der Herstellungsprozess jedoch entscheidend optimiert werden. Forscher entdeckten, dass arktische Bedingungen den Abbau des fragilen Extrakts verhinderten. Also schulte man das Schlachthofpersonal und installierte Kältemaschinen in den Transportwagen. Auf diese Weise gelangten die tierischen Organe nun bei – 25°C in die Hallen von Hoechst.

Mithilfe der Chromatografie, einer neuen physikalisch-chemischen Methode zur Trennung von Substanzgemischen, gelang es in den 1960er Jahren außerdem, die Qualität der Proben drastisch zu erhöhen. Und auch in punkto Quantität erzielten die Wissenschaftler Fortschritte: Die Produktionsmengen stiegen kontinuierlich an, bis im Jahr 2000 täglich mehr als elf Tonnen tierischer Organe von mehr als 100 000 Schlachttieren verarbeitet wurden.

Zu diesem Zeitpunkt stand jedoch längst fest, dass der weltweit wachsende Bedarf an Insulin langfristig nicht durch natürliche Ressourcen zu decken ist. Zu wenig Bewegung verbunden mit zu kalorienreichen Mahlzeiten lassen die Zahl der Diabetiker weiter in die Höhe schnellen. Nach Schätzungen der Weltgesundheitsorganisation WHO gibt es heute insgesamt 177 Millionen Patienten. Bis 2025 soll sich ihre Zahl erneut verdoppelt haben.

Bei der Suche nach alternativen Gewinnungsmöglichkeiten setzte Aventis bereits Ende des vergangenen Jahrhunderts konsequent auf die Biotechnologie. Schon Anfang der 1980er Jahre gelang es, Insulin auch auf gentechnologischem Wege herzustellen. Allerdings erschwerte die hitzige Diskussion um mögliche Risiken der Gentechnologie die weitere wissenschaftliche Arbeit. Während in den USA und den angrenzenden europäischen Nachbarländern die Zulassung für gentechnisch hergestellte Produkte längst vorlag, wirkten die politischen Rahmenbedingungen hier zu Lande hemmend – das deutsche Unternehmen wurde um fast zehn Jahre Entwicklungszeit zurückgeworfen. Doch man nutzte die Zeit des Wartens auf die Zulassung, um die biotechnologischen Verfahren weiter zu verfeinern.

Heute eröffnet die neue Produktionsanlage dem mit weißem Kittel, Sicherheitsbrille und Schutzhelm ausgestatteten Besucher den Blick auf zahlreiche blankpolierte, über zwei Meter hohe Kessel, die wie klobige Giganten regungslos in einer Halle harren. Verbunden durch ein verwirrendes Netz aus Edelstahlrohren, bilden sie das Herzstück der Insulinanlage – ohne dem Betrachter etwas über ihr bewegtes Innenleben zu verraten. Unter dem ständigen Druck eines 1000 PS starken Motors rotieren dort Millionen kleinster Lebewesen, die als Miniaturfabriken für menschliches Insulin dienen. Gemästet mit Nährbouillon und karamelisiertem Zucker, verdoppeln sie alle zwei Stunden ihre Anzahl und produzieren emsig das ersehnte Arzneimittel. Bei einem Druck von 1000 Bar entsteht ein Gemisch verschiedenster Substanzen. Mittels Hightech-Chromatografie fischen die Aventis-Mitarbeiter das lebensrettende Hormon aus der anfangs trüben Suppe.

Der Aufwand lohnt sich. In der neuene Anlage soll ein Insulin namens Glargin produziert werden. Mit diesem derzeit noch in geringeren Mengen in einer älteren Anlage gewonnenen Präparat gelang den Aventis-Wissenschaftlern Mitte der 1990er Jahre ein großer Coup: Das unter dem Namen Lantus vertriebene Produkt besitzt eine kontinuierliche Wirkdauer über 24 Stunden.

Gleichmäßige Versorgung über den Tag

Als so genanntes Basalinsulin stellt es mit nur einer Injektion eine gleichmäßige Insulinversorgung über den Tag sicher: Mit seiner Hilfe sind Diabetiker gewissermaßen 24 Stunden über Normalnull. Das bedeutet, das Medikament vermag die natürliche Grundausschüttung an Insulin nahezu physiologisch nachzuahmen. Denn auch beim gesunden Menschen produzieren die Betazellen der Langerhans-Inseln in der Bauchspeicheldrüse ständig Insulin, auch nachts.

Allerdings wird der Stoffwechselregulator zu den Mahlzeiten vermehrt ins Blut abgegeben. Seine Aufgabe besteht darin, die Zellen aufzuschließen, damit die aufgenommene Glukose, der wichtigste Treibstoff des menschlichen Körpers, in das Zellinnere gelangt und dort verbrannt oder gespeichert wird. Der hohe Zuckergehalt im Blut von Diabetes-Patienten richtet an den unterschiedlichsten Organen beträchtlichen Schaden

STECKBRIEF

Aventis Pharma Deutschland GmbH

- Sitz: Frankfurt
- Gegründet: 1998 durch die Fusion von Rhône Poulenc und Hoechst
- Mitarbeiter: rund 9000
- Produktidee: Innovative Therapien für Diabetiker
- Wissenschaftlicher Hintergrund: Pharmakologie, Biotechnologie

IMPRESSUM

Redaktion: Dr. Carsten Könneker
Art Direction: Karsten Kramarczik
Schlussredaktion: Christina Peiberg, Sigrid Spies
Titelbildgestaltung: Moritz Firchow

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH
Postfach 104840 / D-69038 Heidelberg
Slevogtstr. 3-5 / D-69126 Heidelberg
Tel.: 06221 / 9126-600 / Fax: 06221 / 9126-751
Geschäftsleitung: Dean Sanderson, Markus Bossle

VDI Verlag GmbH
Postfach 10 10 54 / D-40001 Düsseldorf
Heinrichstr. 24 / D-40239 Düsseldorf
Tel.: 0211 / 6188-0 / Fax: 0211 / 6188-112
Geschäftsführung: Raymond Johnson-Ohla

Anzeigen: GWP media-marketing
Postfach 10 26 63 / 40017 Düsseldorf
Sibylle Roth, Tel.: 0211 / 887-2379,
Fax: 0221 / 887-2399
Hartmut Brendt, Tel.: 0211 / 6188-145,
Fax: 0211 / 6188-400
E-Mail: gwp.scitechs@vhb.de

Gesamtherstellung/Druck:
Konradin Druck GmbH, Leinfelden-Echterdingen

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadenersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.

an. Über die Verabreichung von Insulin wird er gesenkt. Unbehandelten Patienten drohen dagegen gefährliche Langzeitschäden an Nieren, Augen, Nerven und Gefäßen.

Um Diabetiker davor zu bewahren, bemüht sich die Forschung darum, die Natur zu überlisten und den Tagesverlauf der physiologischen Insulinproduktion naturgetreu zu imitieren. Lang wirkende Insuline, die den Basalbedarf decken sollen, werden deshalb mit kurz wirksamen, direkt zu Mahlzeiten injizierten Insulinen kombiniert. Mit den kurz wirkenden »Insulin lispro« und »Insulin aspart« waren die Wissenschaftler ihrem Ziel bereits ein Stück näher gekommen. Dennoch erreichten bisher eingesetzte lang wirksame Insuline nur Etappenziele: Während bei den einen die Wirkdauer zu kurz ist, werden bei anderen unerwünschte Wirkspitzen beklagt. Hier brachte das »Insulin glargin«, das erste 24-Stunden-Basalinsulin, den Durchbruch.

Der Trick bei »Insulin glargin« ist so einfach wie genial: Durch den Austausch eines einzelnen Eiweißbausteins wurde der isoelektrische Punkt des Proteins verändert: Wird »Insulin glargin« unter die Haut injiziert, bildet es ein kristallines Depot, das den Wirkstoff weitgehend konstant per Diffusion freisetzt.

Wirksamer als seine Vorgänger sorgt das moderne Basalinsulin auf diesem Weg bei Typ-1- und Typ-2-Diabetikern für einen niedrigen morgendlichen Blutzuckerspiegel. Während beim Typ-1-Diabetiker das körpereigene Insulin fehlt, ist es beim Typ-2-Diabetiker zwar vorhanden, doch reagieren die Zellen der Bauchspeicheldrüse nicht mehr ausreichend sensitiv auf das körpereigene Hormon. Ein weiteres Plus des neuen Präparats: Das Risiko der gefürchteten nächtlichen Unterzuckerungen, die dem Diabetiker nicht nur Schweißausbrüche, Zittern und Koma, sondern auch bleibende Hirnschäden bescheren, wird drastisch reduziert.

Erleichterung durch »Fertigpen«

Seit drei Jahren steht das Medikament zur Verfügung und wird mittlerweile weltweit von rund einer Million Typ-1- und Typ-2-Diabetikern genutzt. Bei Typ-1-Diabetikern wird es zu den Mahlzeiten eingenommen – zusammen mit einem kurz wirkenden Insulin – und bei insulinpflichtigen Typ 2-Diabetikern meist in Kombination mit blutzuckersenkenden Tabletten. Dank eines »Fertigpens« – einer an einen modernen Füllfederhalter erinnernden Injektionshilfe – fällt den Patienten der Stich in die eigene Haut heute leichter.

Die Behandlung von Leonard Thompson war der Beginn einer Erfolgsstory. Ihr Ende ist immer noch nicht geschrieben. Doch schon heute können Diabetiker dank der Behandlung mit Insulin und oralen Antidiabetika ein nahezu normales Leben führen. Vermutlich werden Forscher das Sortiment an Insulinen künftig weiter aufstocken. Für alle Patienten, denen es schwer fällt, auf Grund ihrer Stoffwechselstörung »an der Nadel zu hängen«, warten die Wissenschaftler bei Aventis in Zusammenarbeit mit einem anderen pharmazeutischen Unternehmen schon bald mit einer weiteren Innovation auf. Dann wird es Diabetikern möglich sein, das lebensrettende Hormon einfach zu inhalieren. ◁

Ulla Satzger-Harsch

Die Autorin ist Diplombiologin und freie Medizin- und Wissenschaftsjournalistin in Ostfildern.

INTERVIEW

Inspiration durch Kommunikation

McKinsey-Chef Jürgen Kluge über Naturwissenschaftler und Ingenieure in der Unternehmensberatung und die Qualität unseres Bildungssystems

Herr Kluge – warum ist technologische Innovation für ein Unternehmen so wichtig?
Unternehmen, die Forschung und Entwicklung vorantreiben und Innovationen eine starke Bedeutung beimessen, erzielen überdurchschnittliche Wachstumsraten; die anderen wachsen weniger stark oder schrumpfen sogar. Innovation sorgt auch für mehr Produktivität. So kostet ein neues Auto inflationsbereinigt meist nicht mehr als sein Vorgängermodell, obwohl es den Kunden eine viel breitere Palette technischer Raffinessen bietet. Das ließ sich beispielsweise bei den verschiedenen Generationen des VW Golf beobachten.

Sind Innovationen in neuen Technologiebereichen, etwa der Nanotechnik, lukrativer als in den herkömmlichen Industrien – Beispiel Auto –, weil hier die Märkte noch viel schneller wachsen?
Das ist sicher so. Dennoch dürfen wir die etablierten Technologien keinesfalls unterschätzen. Auch der Automobilbau ist eine Hightech-Industrie, in der zum Beispiel der Elektronik- und Softwareanteil zurzeit rapide zunimmt. Und wahrscheinlich ist die Fahrzeugentwicklung die letzte große Industrie, wo deutsche Unternehmen noch die weltweiten Maßstäbe setzen: Was ein gutes Auto ist, bestimmen nach wie vor wir.

Wer sind die Urheber von Innovation?
Noch immer ist die Vorstellung weit verbreitet, dass hinter den verschlossenen Türen der Forschungs- und Entwicklungsabteilungen neue Welten geschaffen werden. Doch das ist ein Aberglaube. Die eigentliche Quelle von Innovation liegt draußen in der Welt und nicht im Unternehmen. Man muss mit möglichst vielen Leuten reden – nur so kommen die notwendigen Anregungen und Ideen zusammen.

Aber danach müssen diese Ideen im Unternehmen umgesetzt werden.
Natürlich. Dafür braucht man erstklassig ausgebildete Wissenschaftler und Techniker, die auch mit anderen Menschen umgehen können, nicht zuletzt international. Darüber hinaus empfiehlt es sich, junge Leute, die wissbegierig nach neuen, manchmal sogar unkonventionellen Wegen suchen, und erfahrene Mitarbeiter an einen Tisch zu holen.

Was ein gutes Auto ist, bestimmen nach wie vor wir

Ist Innovation planbar?
Nicht vollständig jedenfalls. Ohne ein entscheidendes Moment des Glücks, des Zufalls, der Intuition geht es nicht.

Und das bringen dann Unternehmensberater ein?
In der Regel nicht. Berater tragen die Außensicht ins Unternehmen. Sie orchestrieren den Prozess und schaffen Strukturen, um guten Vorschlägen zum Erfolg zu verhelfen. Aber auch sie selbst haben manchmal sehr gute Ideen.

Stellen Sie persönlich gern Absolventen aus den naturwissenschaftlich-technischen Fächern ein?
Immer häufiger sogar. Mittlerweile sind mehr als die Hälfte unserer Mitarbeiter keine studierten Wirtschaftswissenschaftler, sondern kommen aus den verschiedensten Disziplinen. Denn Diversität ist ein Gütesiegel: Je besser ein Beraterteam gemischt ist, desto höher seine Erfolgschancen. Bei McKinsey ist es bei weitem keine Seltenheit, wenn ein Team aus einem Betriebswirt, einem Juristen, einem Physiker und einem Geisteswissenschaftler besteht.

Sollten mehr Unternehmenschefs einen naturwissenschaftlich-technischen Hintergrund haben?

MCKINSEY

Jürgen Kluge

- Jahrgang 1953
- Studium der Physik in Köln; Promotion in Essen
- 1984 Einstieg als Berater bei McKinsey & Company
- Schwerpunkte der Beratertätigkeit: Automobilindustrie, Maschinenbau, Elektronik-Industrie, Technologie-Management, Strategie und Innovation
- seit 1999 Office Manager der sieben deutschen Büros von McKinsey & Company
- Autor des Sachbuch-Bestsellers »Schluss mit der Bildungsmisere. Ein Sanierungskonzept«, Campus Verlag 2003

Das war hier zu Lande ja lange Zeit so. In der chemischen Industrie zum Beispiel musste der Vorstandsvorsitzende selbstverständlich in Chemie promoviert haben; und in einem Elektrokonzern machten Ingenieure oder Physiker die ganz großen Karrieren. Ich persönlich glaube, das war eine ganz gute Tradition – wenn es sich nicht um reine Technikerlaufbahnen handelte.

Was raten Sie zielstrebigen jungen Leuten heute?

Ein technisches Studium zu absolvieren und anschließend eine betriebswirtschaftliche Zusatzausbildung.

In den Wachstumsmärkten wie etwa der Biotechnologie verlieren deutsche Unternehmen Marktanteile. Was ist zu tun?

Wir müssen die Ausgaben für Forschung und Entwicklung glatt verdoppeln. Und das geht auch: Zirka zehn Prozent des gesamten Bundesetats sollten zur Manövriermasse gemacht werden. Industrieunternehmen sind so flexibel. Sie heben sogar bis zu dreißig Prozent im Gesamtbudget um, wenn sie es für nötig halten – etwa in einer Krise.

Wie sollten zusätzliche öffentlichen F&E-Gelder investiert werden?

Auf keinen Fall dürften wir sie einfach in die bestehenden Strukturen gießen. Stattdessen sollte man in den zehn wichtigsten Schlüsseldisziplinen völlig neue Kompetenzzentren gründen, in denen die besten internationalen Wissenschaftler forschen. Das bringt Konkurrenz, von der wir alle profitieren.

Die eigentliche Krise kommt erst noch

Haben wir in den Naturwissenschaften auch ein Ausbildungsproblem?

Ein doppeltes sogar: Ganz generell haben wir mittlerweile massive Schwierigkeiten mit der Qualität unseres Ausbildungssystems. Darüber hinaus aber bilden wir nicht genügend Naturwissenschaftler und Techniker aus. Das mag zum Teil daran liegen, dass nicht jeder in gleichem Maße talentiert ist für Mathematik und Physik. Aber wir sollten die Begeisterung möglichst früh wecken. Kinder sind äußerst wissbegierig. Sie wollen lernen. Warum also Talente, die man frühzeitig erkennt, nicht von Anfang an unterstützen und fördern?

Sehen Sie Anzeichen der Besserung?

Noch nicht wirklich. Dabei dürfen wir keine Zeit verlieren. Wenn Sie einmal die Anzahl der Abgänger in den Schlüsselfächern mit der Qualität der Ausbildung »multiplizieren«, dann erkennen Sie, dass wir gegenwärtig und wohl auf absehbare Zeit auf dem Höhepunkt unserer volkswirtschaftlichen Leistungsfähigkeit sind. Die eigentliche Krise kommt also erst noch auf uns zu! Das liegt schon allein daran, dass die Zahl der Studierenden mit den geburtenschwachen Jahrgängen abnimmt. Mit anderen Worten: Qualität wird in Zukunft noch wichtiger, als sie es heute schon ist. Hier müssen wir investieren.

Warum ist es schwer, junge Menschen für ein Chemie- oder Maschinenbaustudium zu begeistern?

Das liegt an der – gemessen am wirklichen Wert – viel zu geringen Wertschätzung dieser Berufe. Wir meinen heute, dass unser Wohlstand auf allen möglichen Dingen beruht. Dabei verdanken wir ihn – zugespitzt formuliert – im Wesentlichen den Leistungen von ein paar ganz besonders qualifizierten Naturwissenschaftlern und Ingenieuren, die Neues in die Welt gesetzt haben. Diesen Vorbildern müssen wir nacheifern. ◁

Das Interview führte **Carsten Könneker**.

MECHATRONIK

Maschinen mit Fingerspitzengefühl

DLR, INSTITUT FÜR ROBOTIK UND MECHATRONIK

Auf Roboter kommt eine Menge Arbeit zu – im Weltraum wie auf der Erde.

Die am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt entwickelten Roboterarme finden weltweit Anklang.

Das Weltall ist weit, faszinierend – und noch immer weitgehend unerforscht. Kein Wunder, dass man zum Stopfen der Wissenslücken zunehmend Roboter auf Mission schickt. Schließlich ist die bemannte Raumfahrt riskant. Und überhaupt erledigen Maschinen so manchen kniffligen oder langweiligen Job einfach besser als Menschen.

Zukunftweisende Arbeit in Sachen Weltraumrobotik wird im bayerischen Oberpfaffenhofen geleistet. Dort hat das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) seinen Sitz. Doch nicht nur im Orbit profitiert man von den Entwicklungen des DLR-Instituts für Robotik und Mechatronik. Auch am PC, in der Fahrzeugtechnik oder der Chirurgie finden die Schöpfungen der Mitarbeiter um Institutsleiter Gerd Hirzinger vielfältige Einsatzmöglichkeiten.

Die DLR-Roboter arbeiten nicht nur autonom, sondern auch komfortabel fernsteuerbar als »verlängerter Arm des Menschen«. Dabei vermitteln die neuesten Leichtbaumodelle ihrem Bediener durch Informationsrückkopplung bereits ein verlässliches Gefühl dafür, welche Kraft er in der Ferne einsetzt – und einsetzen muss, etwa um eine Schraube in einem entlegenen Kanalschacht festzudrehen. Inzwischen kann ein moderner Roboterarm ganz lässig einen zugeworfenen Tennisball fangen oder ohne zu kleckern Kaffee servieren (siehe Bild oben). Wie der menschliche Arm verfügt er über sieben Freiheitsgrade.

Mittlerweile ist die komplette Steuer-, Leistungs- und Signalelektronik in die Arme der Maschinen integriert. Die Drehmomentregelung in allen Gelenken erlaubt erstmalig die Realisierung »gefühlvoller« Gliedmaßen, die beliebig nachgiebig reagieren. Ergänzt werden die Arme durch Vier-Finger-Hände mit 12 oder 13 Bewegungsfreiheitsgraden.

»Diese Technik bedeutet einen Meilenstein für die Robotik«, ist sich Hirzinger sicher. Als fernsteuerbares System soll sie zum Beispiel Astronauten entlasten beziehungsweise ganz ersetzen – etwa bei Arbeiten im freien Weltraum, wo die Gefährdung durch herumfliegende Partikel ständig zunimmt. Bereits 1993 hatte das Institut mit der inzwischen verunglückten US-Raumfähre Columbia den weltweit ersten ferngesteuerten Roboter »Rotex« in den Weltraum geschickt.

Abschleppdienst im Orbit

Der nächste Schritt könnte ein kletterfähiger oder sogar frei fliegender Service-Roboter sein, der defekte Module oder Geräte im Weltraum inspiziert, repariert, mit Energie versorgt – oder auch gezielt zum Absturz bringt. Derzeit bemühen sich amerikanische Firmen um die Lizenzierung eines am Oberpfaffenhofener Institut entwickelten »Capture-Tools«, mit dem ein Service-Satellit einen geostationären Satelliten, dem der Treibstoff ausgeht, ansteuern und einfangen kann. »Das gemeinsame Merkmal solcher Satelliten ist die Steuerdüse«, erläutert Hirzinger. »Das Capture-Tool erkennt sie und steuert sie von hinten an. Von der Bodenstation aus können wir dann einen Dorn einführen und durch Aufspreizen fixieren.« Angedockt an den ausgelaugten Bruder, kann der Retter dessen Funktionsdauer dann um Jahre verlängern – dank des eigenen Ionenantriebs. Dass die zu erwartenden »astronomischen« Einsparungen reihenweise Investoren locken, versteht sich fast von selbst.

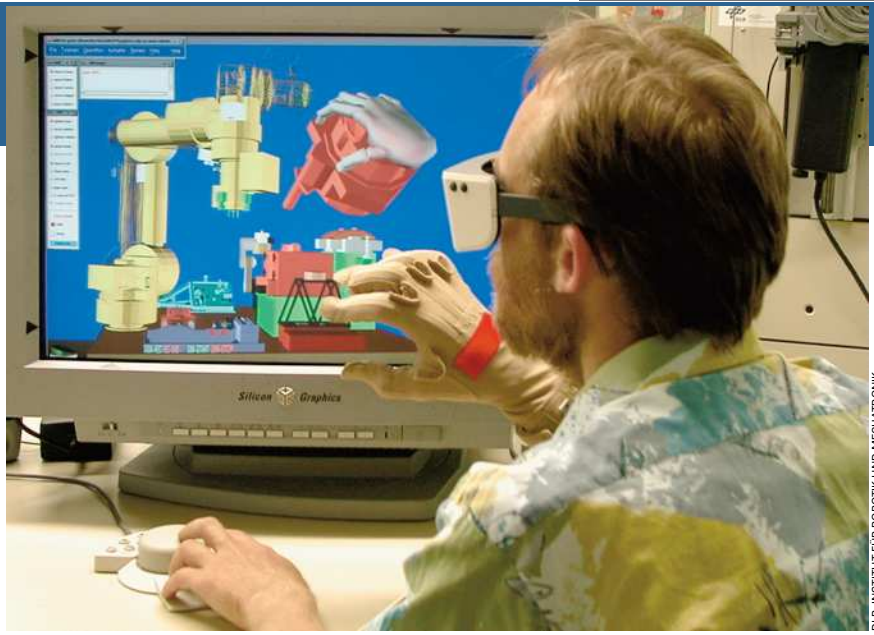
Die Fantasien der Entwickler am DLR sind durchaus bodenständig, offenbaren ihre Hightech-Schöpfungen doch ein enormes Transfer-Potenzial für terrestrische Anwendungen – hauptsächlich in den vier Bereichen Mensch-Maschine-Interaktion, Industrierobotik, Medizin sowie Fahrzeugtechnik.

Das 3D-Mensch-Maschine-Interface »Space Mouse« (siehe Bild rechts oben) ist zum Beispiel hervorgegangen aus der für die Rotex-Fernsteuerung entwickelten Steuerkugel; mit fast 300 000 installierten Systemen ist sie das erfolgreichste europäische Computer-Peripheriegerät. Eingesetzt wird sie bereits standardmäßig etwa in den 3D-Konstruktionsbüros der Automobilhersteller. Als Tochter des weltweit größten Computermaus-Her-

stellers Logitech betreibt heute die Firma 3D Connexion in Seefeld bei München unter DLR-Lizenz die internationale Vermarktung. Das Geheimnis der Space Mouse beruht auf einem verblüffend einfachen, von DLR-Mitarbeitern patentierten optoelektronischen Messprinzip. Auch Deutschlands führender Hersteller von Industrierobotern, die Augsburger Firma Kuka, programmiert ihre fleißigen Arbeitskräfte mit der Space Mouse.

Kuka-Roboter profitieren aber auch noch an anderer Stelle von den Forschungen am DLR: So verrichten sie ihre Aufgaben schon allein dadurch um bis zu dreißig Prozent schneller, dass sie mit den Optimierungsverfahren des DLR-Instituts und der in Echtzeit in der Steuerung mitgerechneten komplexen Dynamik jetzt quasi selbst wissen, wie schnell sie sich auf einer vorprogrammierten Bahn gerade noch bewegen können – ohne die eigenen künstlichen Gelenke zu überlasten. Die kürzlich integrierte »elastische Bahnplanung« rechnet sogar die Getriebe-Elastizitäten mit ein und sorgt durch intelligente Ansteuerung der Motoren dafür, dass die Roboter sich auch bei hoher Geschwindigkeit präzise auf ihrer Bahn bewegen und am Endpunkt extrem schnell und fast ohne Überschwingen stoppen.

Grundsätzlich ist das ferngesteuerte Manipulieren und Hantieren an einem schwer zugänglichen Ort wie dem Weltraum, der Tiefsee oder dem Innern des menschlichen Körpers ein Problem der so genannten Telepräsenz. Diese Unterdisziplin der Robotik ist gekennzeichnet durch die Übertragung von Stereobildern, haptischen Signalen, Temperatur, Geräuschen und fallweise weiteren von einem Roboter erhobenen Daten an einen überwachenden Menschen. Derzeit ist diese Technik im Begriff, die Chirurgie zu revolutionieren. Viele Ärzte werden schon bald mit zwei robotergeführten Instrumenten minimal invasiv operieren, wodurch selbst schwere Eingriffe an inneren Organen ohne große Schnitte möglich werden. Der Chirurg operiert dabei typischerweise an einem Steuerpult und dirigiert die Mini-Teleroboter beidhändig per Joystick durch den Körper des Patienten.



DLR, INSTITUT FÜR ROBOTIK UND MECHATRONIK

Durch feinfühliges Auslenken der Steuerklappe erlaubt die »Space Mouse«, ein 3D-Grafik-Objekt oder ganze virtuelle Welten in sechs Raumfreiheitsgraden gleichzeitig frei zu steuern.

Vorbereitet wird sogar das Arbeiten am bewegten Organ. Dadurch soll etwa die künstliche Herbeiführung eines Herzstillstands, wie es bei einigen Herz- und Bypass-Operationen bisher geschieht, überflüssig werden. Der das Endoskop führende Roboter kalkuliert und antizipiert dabei die Herzbewegung, während der Operationsroboter sein Ziel synchron dazu ansteuert. Auf diese Weise kann der Chirurg am vermeintlich stillstehenden Organ operieren.

»Drive by wire«

Auch in der Fahr- und Flugzeugtechnik finden Robotik-Entwicklungen viele Einsatzmöglichkeiten. Antiblockiersystem und elektronische Lenkhilfe gehören heute bereits weitenteils zur Standardausrüstung von Neuwagen. Und auch bei »Drive by wire« könnte das demnächst der Fall sein. Darunter versteht man eine neuartige elektronische Lenkung von Fahrzeugen, bei der das Lenkrad überhaupt nur mehr elektronisch mit der Spurstange verbunden ist und der Fahrer in seinem Arm künstlich generierte Drehmomente spürt. Der Clou dieser Technik: In gefährlichen Fahrsituationen, etwa bei plötzlich auftretendem Seitenwind, korrigiert die Elektronik den Kurs durch instantane Lenkbewegungen automatisch.

Auch Fahrsimulatoren profitieren von der neuen Technik. So wurden für BMW Kraft reflektierende Joysticks als Ersatz für Lenkrad, Gaspedal und Bremse entwickelt. Diese Instrumente verschaffen dem Fahrer fühlbare Rückmeldungen der virtuellen Piste in Hände und Füße – das Fahren am Simulator wird noch »echter«.

Und auch für das Bremsen hat Hirzinger Neues in petto: »Wir haben eine Anleihe bei den alten Kutschböcken gemacht.« Die wiederbelebte Technik bezieht Bremsenergie aus der kinetischen Energie des Fahrzeugs und nicht aus dem Antrieb: Zwischen die Bremsbacken wird ein Keil geschoben – wie einst in die Speichen des guten alten Pferdefuhrwerks. Doch anders als damals sorgen jetzt hochmoderne mechatronische Systeme dafür, dass kein Rad blockiert.

Auch Flugzeuge könnten dank neuer DLR-Entwicklungen bald sparsamer und sicherer werden. Eine robuste mechatronische Flugregelung soll bei Triebwerksausfall, bei starken Böen sowie bei der Automatisierung des Landeanflugs zum Einsatz kommen.

Die Innovationen des DLR-Instituts für Robotik und Mechatronik haben inzwischen zur Schaffung und Erhaltung von hunderten Hightech-Arbeitsplätzen geführt. Mechatronik, die Integration von Maschinenbau mit Optik, Elektronik und Informatik, wird die Industriegesellschaft von morgen stark prägen. »Unsere Roboter«, schließt Hirzinger, »werden in Zukunft alle Hände voll zu tun haben.« Keine Frage – und mit ihnen die Entwickler. ◁

Claus M. Schmidt

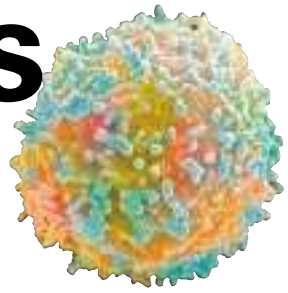
Der Autor ist Wissenschaftsjournalist in München.

STECKBRIEF

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Robotik und Mechatronik

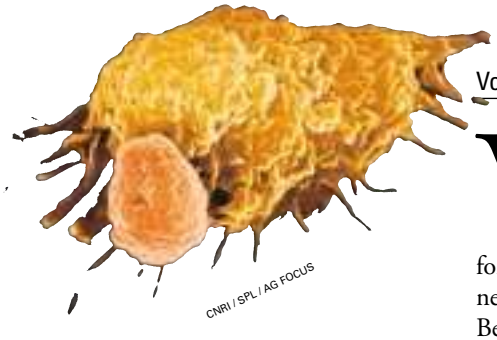
- Sitz: Oberpfaffenhofen
- Mitarbeiter: 100
- Produktidee: Innovative Robotik- und Mechatronik-Anwendungen in den Bereichen Weltraumfahrt, Medizin, Fahrzeugtechnik und Mensch-Maschine-Interaktion

Die Bodyguards des Körpers



SPL / AG FOCUS

Je tiefer die Forscher in die Geheimnisse des Immunsystems eindringen, desto verwickelter erscheinen die Interaktionen zwischen den beteiligten Zellen und Molekülen. Wie weit konnte die Medizin von den Fortschritten der letzten 25 Jahre auf diesem Gebiet profitieren?



CNRI / SPL / AG FOCUS

Von Philippe Kourilsky

Vor 25 Jahren erschien mir die Immunologie noch wie eine fremde Welt. Sie hatte weniger von einer Wissenschaft als von einer Kunstform. Als Molekularbiologe war ich auf meinem Feld einheitlich gebrauchte Konzepte und Begriffe gewohnt. In den immunologischen Labors dagegen herrschte eine verwirrende Nomenklatur. Es hatten sich Schulen herausgebildet, zu denen man nur nach regelrechten Initiationsriten zugelassen wurde, und das Vertrauen in ein Forschungsergebnis maß sich vor allem am Renommee der beteiligten Autoren. Erst als sich das moderne molekularbiologische und -genetische Denken – gegen manch anfänglichen Widerstand – auch in der Immunologie durchsetzte, wurde dort die Methodik standardisiert, die Nomenklatur vereinheitlicht und damit die Kommunikation vereinfacht.

Die Immunologen hatten seit der »Gründerzeit« ihrer Disziplin, vor mehr als hundert Jahren, mit traditionellen biochemischen Verfahren durchaus bemerkenswerte Ergebnisse erzielt, beispielsweise bei der Erforschung der Antikörper. Mit der modernen Molekulargenetik nun boten sich natürlich ganz neuartige Analysemöglichkeiten – eben auch für die Immunologie.

Als einer der Meilensteine der Gentechnologie – der damals jüngsten Entwicklung der Molekulargenetik – gilt das Jahr 1975:

▶ Fred Sanger am Molekularbiologischen Laboratorium des britischen medizinischen Forschungsrates in Cambridge veröffentlichte die erste ermittelte Sequenz eines aus DNA bestehenden Erbmoleküls, und zwar von einem Bakterienvirus.

▶ Fachwissenschaftler erörterten auf der Konferenz von Asilomar nahe Monterey in Kalifornien, welche Chancen, aber auch welche Risiken das neue Forschungsgebiet birgt, und empfahlen Richtlinien zum Einsatz der DNA-Rekombinationsverfahren.

▶ François Rougeon, Bernard Mach und mir gelang es erstmals, die Boten-RNA eines Gens in eine »DNA-Kopie« umzuschreiben und zur Vermehrung – zur Klonierung – in das Bakterium *Escherichia coli* einzuschleusen. Es handelte sich um das Globin-Gen von Kaninchen. Das zugehörige Protein ist unter anderem Bestandteil des roten Blutfarbstoffs Hämoglobin. Mit unserer Methode ließen sich nun einzelne Gene aus der Unzahl anderer im Erbgut höherer Organismen isolieren und untersuchen.

Aus 1975 stammt auch ein Meilenstein immunologischer Forschung: Der Deutsche Georges Köhler und der Argentinier César Milstein schafften es in Cambridge, durch Fusion mit speziellen Krebszellen so genannte B-Lymphocyten »unsterblich zu machen«; sie teilen sich in einer Kultur dann unbegrenzt weiter. Dieser Zelltyp gehört zu den weißen Blutkörperchen und stellt eine der Säulen der Immunabwehr dar: Er erzeugt die Antikörper, auch Immunglobuline genannt. Sie gehören zu den wichtigsten Molekülen, mit denen der Organismus gezielt körperfremde Strukturen als »Antigene« erkennt. Alle Nachkommen einer Vorläuferzelle produzieren das gleiche Immunglobulin, bei jedem Vorläufer aber ein anderes. Durch das 1976 veröffentlichte Verfahren konnten erstmals große Mengen identischer Antikörper gewonnen werden, die für Medizin und Forschung von unschätzbarem Wert sind – etwa zum Nachweis von Erregern oder von interessierenden Proteinen.

SERIE

25 Jahre Spektrum der Wissenschaft

In dieser 12-teiligen Serie berichten prominente Forscher aus ihrem Fachgebiet über wissenschaftliche Highlights der letzten 25 Jahre, die aktuelle Situation und künftige Perspektiven.

Teil I: Paläoanthropologie
Teil II: String-Physik
Teil III: Gehirnforschung
Teil IV: Klimaforschung
Teil V: Mathematisches Denken
Teil VI: Ultrakalte Atome
Teil VII: Die Chemie beherrschen
Teil VIII: Entzifferung des Genoms
Teil IX: Informationstheorie
Teil X: Sand und Gele
Teil XI: Immunsystem

Im nächsten Heft
Teil XII: Kosmologie

Ein Jahr später, 1977, isolierte Susumu Tonegawa, damals am Institut für Immunologie in Basel, das Gen eines Antikörpers. Damit war er in der Lage, die genetische Grundlage der immensen Vielfalt an Antikörpern detailliert zu untersuchen. Zwar wusste man schon seit dem ausgehenden 19. Jahrhundert um die Existenz solcher Schutzstoffe, unklar war aber immer noch, wie ein Säugetier Abermillionen verschiedener Sorten herstellen kann. Wie sich zeigte, ist ein Antikörper-Gen zunächst gar nicht als solches vorhanden. Ein funktionsfähiges Gebilde entsteht erst nach dem Baukastenprinzip: durch eine komplexe Umlagerung, bei der ursprünglich getrennt auf dem Chromosom angeordnete Untergene auf vielfältige Weise miteinander kombiniert werden. Dieser Vorgang läuft während der Entwicklung von B-Zellen im Körper ab. Zur Erkennung eines Antigens nutzt jede B-Zelle im Prinzip eine Form ihres Antikörpers, die wie eine Antenne in der Zellmembran verankert ist. Ihr Antigen-Rezeptor ist daher ebenfalls ein Immunglobulin.

Verträgliche Spenderorgane

Die zweite große Klasse von Immunzellen, die so genannten T-Lymphocyten, waren damals noch wesentlich weniger erforscht. Man wusste, dass sie für die zelluläre Immunreaktion verantwortlich sind – das heißt keine Antikörper abgeben, sondern gewissermaßen persönlich vor Ort eingreifen – und dabei ebenfalls eine Fülle von Antigenen erkennen. Ob auch ihr Antigen-Rezeptor ein Immunglobulin ist, konnte erst 1984 definitiv geklärt werden. Die Gene für dieses Molekül erwiesen sich bei Mensch und Maus immerhin als Verwandte der Immunglobulin-Gene aus B-Zellen.

Anfang der 1980er Jahre wussten die Immunologen auch, dass der T-Zell-Rezeptor »sein« Antigen praktisch nur dann erkennt, wenn er es gewissermaßen auf einem Tablett serviert bekommt. Bei den Präsentiertellern handelt es sich um so genannte MHC-Moleküle der Klasse I und II. Ihre Gene drängen sich in einer Region des Erbguts: dem Haupt-Histokompatibilitätskomplex (englisches Kürzel: MHC). Jean Dausset, George Snell und Baruj Benacerraf erhielten für die Entdeckung dieser Moleküle und ihrer Genregion bei Menschen und Mäusen 1980 den Nobelpreis für Medizin. Diese Strukturen auf der Oberfläche von Zellen bestimmen entscheidend, ob ein Transplantat gewebsverträglich – histokompatibel – ist oder umgekehrt abgestoßen wird. Die Bezeichnung MHC-Moleküle wurde zwar ursprünglich für die Maus gewählt, hat sich inzwischen aber weitgehend auch für die entsprechenden Moleküle des Menschen eingebürgert, die aus historischen Gründen humane Leukocyten-Antigene heißen.

P. MOTTA / SPL / AG FOCUS

Ein Vorläufer eines Makrophagen (dicke Kugel oben) zwängt sich durch eine Blutkapillare. Er wandelt sich in die amöbenartige Fresszelle um (Seite 28 ganz links), die Kontakt zu Lymphocyten aufnimmt (kleine Kugel ganz links und oben auf Seite 28). Beide Zellsorten sind unverzichtbar für das Immunsystem.

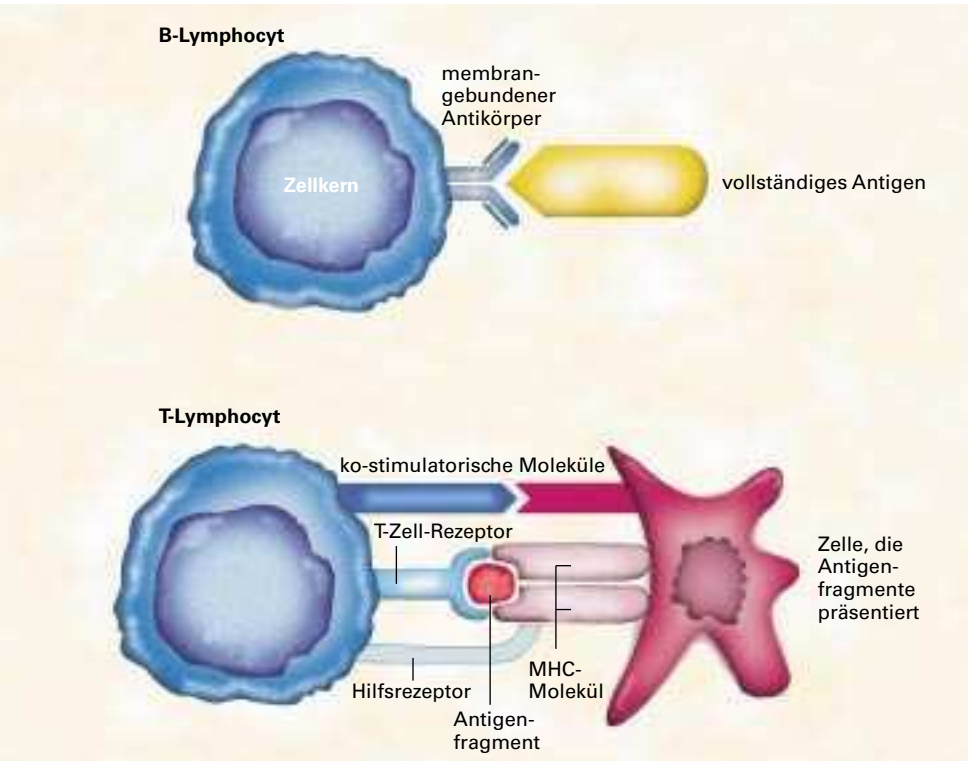
Uns gelang es 1981, verschiedene Gene der Klasse I des MHC-Komplexes aus Mäusezellen zu isolieren, und zwar wieder in Form rückkopierter DNA – damals wegen der geringen Konzentration der entsprechenden Boten-RNAs ein technisches Kunststück. Im Laufe der Arbeiten zum Aufbau dieser Gene und der Funktion ihrer Genprodukte vollzog ich, ohne es recht zu merken, die Wandlung vom Molekularbiologen zum Immunologen.

Anfang der 1980er Jahre standen MHC-Gene und ihre Proteine im Zentrum der Aufmerksamkeit vieler Immunologen, nicht nur aus theoretischen, sondern auch aus medizinischen Gründen. Die eigenen MHC-Proteine verkörpern für das Abwehrsystem das »Selbst«, das »Nicht-Fremde«. Ihre erstaunliche Vielgestaltigkeit von Mensch zu Mensch offenbart sich – für Mediziner leider – besonders augenfällig am Phänomen der Transplantatabstoßung. Da sich die Probleme von Grundlagenforschern und Medizinern im Bereich der Transplantation trafen, entstand eine regel- ▷

Lymphocyten sind die Hauptakteure einer gezielten Abwehr. B-Zellen, die Antikörperfabriken des Immunsystems, werden durch vollständige Antigene stimuliert. T-Zellen dagegen entfalten ihre Funktion als Killer, aber auch als Helfer und Friedensstifter, sobald ihnen ein passendes Antigenbruchstück in den »Zangen« eines so genannten MHC-Moleküls von Zellen dargeboten wird.

▷ rechte interdisziplinäre »MHC-Gemeinschaft«. Es ging um standardisierte Methoden zur Typisierung der MHC-Proteine bei Spender und Empfänger, außerdem um eine reibungslos funktionierende Organisationsstruktur zur Registrierung und zur Verteilung von Spenderorganen. Die Problematik wuchs, je mehr es Praxis wurde, Organe zu transplantieren und Patienten nach einer hochaggressiven Chemotherapie, etwa gegen Blutkrebs, Knochenmark von Spendern zu übertragen. Man versuchte, die verschiedenen Abwehrreaktionen einerseits durch Verpflanzen immunologisch möglichst passender Organe oder Zellen in den Griff zu bekommen, andererseits aber auch durch Unterdrücken der Immunantwort. Zu den bedeutenden pharmakologischen Erfolgen dieser Forschung gehört vor allem der Wirkstoff Cyclosporin, der Abwehrreaktionen unterdrückt. Seine medizinische Karriere an Patienten begann 1981.

Warum aber nur reagierten die T-Lymphocyten so stark auf Zellen, die abweichende MHC-Proteine trugen? Man wusste damals zwar, dass diese Moleküle an der Präsentation fremder Antigene beteiligt sind und besonders auch auf Fresszellen vorkommen, aber nicht, wie die Erkennung funktionierte. Fresszellen wie die Makrophagen verschlingen und verdauen unter anderem Bakterien. 1981 zeigte nun Emil Unanue, heute an der Universität von Washington in St. Louis, mit seinen damaligen Kollegen, dass die MHC-Moleküle der Klasse II von Makrophagen nicht etwa ganze Protein-Antigene präsentieren, sondern nur Fragmente. Dazu werden die Fremdmoleküle zunächst in den Fresszellen enzymatisch zerlegt und mit ihrem MHC-Partner zur Zelloberfläche befördert. Im Gegensatz zu Antikörpern bekommt ein T-Zell-Rezeptor somit nicht das ganze Antigen zu Gesicht und heftet sich an einen Verbund aus MHC-Molekül und Proteinfragment. Vier Jahre später wurde dies auch für Moleküle der Klasse I belegt.



POUR LA SCIENCE

Kostproben aus dem Zellinneren servieren

Die Erkenntnis, dass ein doppeltes Erkennungssystem für ein und dasselbe Antigen existiert, warf auch ein völlig neues Licht auf die Kooperation der beiden großen Klassen von Immunzellen. Wenn nämlich der membranständige Antikörper einer B-Zelle ein Antigen bindet, wird es ebenfalls vereinnahmt und zerlegt. MHC-II-Moleküle präsentieren dann Stückchen davon. Wenn daran wiederum so genannte T-Helferzellen mit ihrem Rezeptor andocken, geben sie aktivierende Substanzen ab, sodass sich die B-Zelle zur Produktion von Antikörpern vermehrt.

Außerdem zeichnete sich ab, welche Bedeutung die so genannten T-Killerzellen haben könnten, die ihre Ziele – vor allem virusinfizierte Körperzellen – mithilfe der MHC-Moleküle der Klasse I finden. Die verstärkte Erforschung dieses Zelltyps leitete ein Umdenken ein. Entgegen der gängigen Auffassung erwies sich diese Abwehr-Einheit für die Wirksamkeit von Impfstoffen als wesentlich. Zuvor hatte man das Potenzial eines Vakzins nur an der Menge der Antikörper gemessen, die der Organismus nach dem Impfen produziert. Unter anderem deswegen scheiterten auch die ersten Versuche zur Entwicklung eines Impfstoffs gegen das 1983 isolierte Aids-Virus: Die Forscher hatten die T-Killerzellen, die für den Erfolg einer Impfung gegen viele Erreger von herausragender Bedeutung sind, schlichtweg vernachlässigt.

Zusammen mit Jean-Michel Claverie entdeckte unsere Gruppe 1986 verblüfft, dass die MHC-Moleküle keinen Unterschied zwischen körpereigenen und fremden Proteinen machen, vielmehr von beiden Sorten winzige Bruchstücke – fachlich Peptide genannt – präsentieren. Demnach musste jede Zelle mit MHC-Molekülen der Klasse I, und damit die große Mehrheit aller Körperzellen, eine Vielzahl von »Kostproben« ihrer eigenen Proteine darbieten. Daraus schlossen wir – wie sich herausstellte zu Recht –, dass T-Lymphocyten inmitten dieser verwirrenden Mischung körpereigener Peptide die ihnen fremden mit extremer Sensitivität erkennen können. Da sich aber Menschen in ihren MHC-Molekülen unterscheiden und jede Variante eine eigenes Sor-

timent von Bruchstückchen favorisiert, präsentierten die Zellen jedes Individuums zwangsläufig auch eine andere Auswahl von Peptiden – körpereigenen wie fremden. Kam also Spendergewebe mit auch nur einem anderen MHC-Molekül in den Körper, präsentierte es eine dem Immunsystem unbekannte Zusammenstellung tausender winziger Proteinstücke aus dem Zellinneren. Dies erklärte, warum Transplantate so heftig abgestoßen werden: Die Immunreaktion richtet sich nicht nur gegen das fremde MHC-Molekül auf den Zellen, sondern gegen Tausende unbekannter Peptide aus dem Inneren.

Damit ging die Überwachungsfunktion des Immunsystems viel weiter als zunächst gedacht. Da für ihn auch innere, scheinbar verborgene Proteine anhand ihrer Kostproben »sichtbar« sind, können an der Oberfläche von Krebszellen verdächtige Peptide auftauchen, die einen Tumor verraten und die Killerzellen auf sich ziehen. Dass es spezifische »Tumorantigene« gibt, hatte Thierry Boon am Ludwig-Institut in Brüssel Anfang der 1980er Jahre nachgewiesen.

Zwar ermittelten Forscher nach und nach durch elegante Röntgenstrukturanalysen die räumliche Struktur der MHC-Moleküle (1987 zuerst der Klasse I), des T-Zell-Rezeptors sowie des dreiteiligen Verbundes aus beiden und dem erkannten Peptid. Trotzdem blieb rätselhaft, wie die T-Lymphocyten mit so unglaublicher Präzision Antigene erkennen und unterscheiden können, wenn nicht vielfältige Hilfsmoleküle oder Ko-Rezeptoren auf kooperierenden Zellen mit eingriffen.

Die besonders fruchtbare Phase zwischen 1980 und 1995 brachte auch in dieser Richtung neue Erkenntnisse. Beispielsweise wurde klar, wie bedeutsam die so genannten dendritischen Zellen für die Immunreaktion sind. Diese Vertreter der weißen Blutkörperchen, mit Funktionen ähnlich den Makrophagen, nisten sich zunächst in der Haut und in Schleimhäuten ein. Über ihre langen Fortsätze fischen sie aus ihrer Umgebung selbst winzige Mengen körpereigenes und fremdes Material heraus. Nach ihrer Wanderung in die Lymphknoten präsentieren sie Häppchen davon auf MHC-Molekülen. Damit und über ko-stimulatorische Oberflächenmoleküle aktivieren sie dort wartende »junge« Immunzellen.

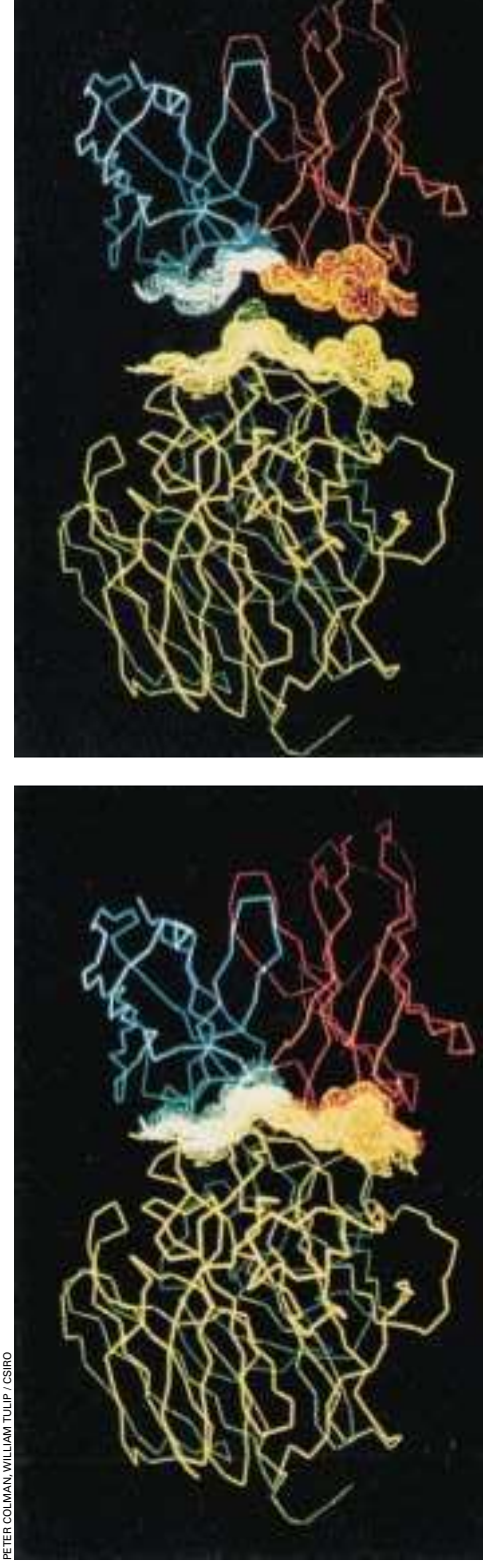
Neben weiteren Oberflächenmolekülen konnten die Forscher in diesen 15 Jahren zahlreiche von Immunzellen freigesetzte Botenstoffe charakterisieren, darunter vor allem Immunhormone wie die Interleukine – Interleukin I wurde zum Beispiel 1981 entdeckt – und immunologische Lockstoffe wie die Chemokine. Dies brachte reiche neue Erkenntnisse über die Interaktionen der Abwehrzellen, ihre Aktivierung und Inaktivierung.

Enorme Fortschritte wurden auch bei der Erforschung der Befehlskette innerhalb von Zellen erzielt. Viele Signale regen die Zelle zur Teilung oder zur Reifung an. Andere lösen in den Zellen ein Selbstzerstörungsprogramm aus, die so genannte Apoptose. Das erstmals 1972 formulierte Konzept des Zellselbstmords ist für wenige Gebiete der Biologie so bedeutsam geworden wie für die Immunologie. Durch ihn wird das Gleichgewicht zwischen den Populationen verschiedener Zelltypen aufrechterhalten, die sich ständig erneuern. Auch Körperzellen, die das Immunsystem als »abweichend« einstuft, erhalten den Befehl zum Harakiri – durch eine molekulare Todesbotschaft oder durch persönliche Aufforderung seitens der Immunzellen. Eine revolutionäre Erkenntnis der Apoptose-Forschung war, dass viele Zellen nicht auf Leben, sondern auf Sterben programmiert sind: Sie leben nur so lange, wie sie Signale erhalten, die sie an der Selbstzerstörung hindern. Erst so war es auch möglich zu verstehen, wie Lymphocyten funktionieren und wie sie zur erworbenen und zur angeborenen Immunität beitragen.

Rasche Eingreiftruppen

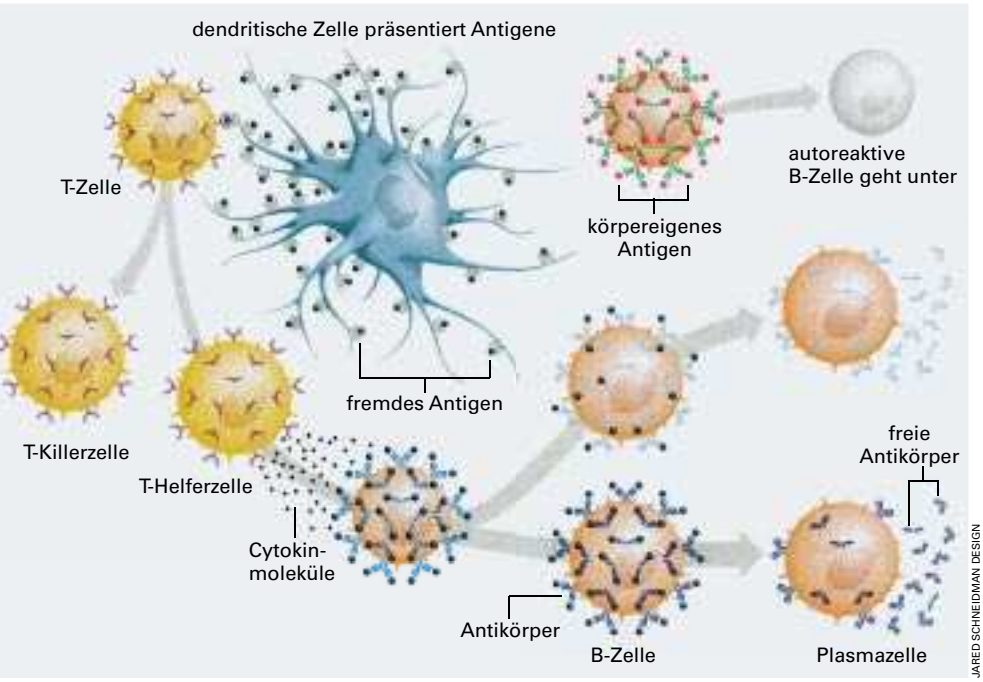
Von erworbener oder auch adaptiver – anpassungsfähiger – Immunität sprechen Fachleute bei T- und B-Zellen, weil deren Aktion erst eine Art Lernphase erfordert. Zusätzlich gibt es aber noch eine angeborene, natürliche Immunität. Deren Bedeutung wurde jahrzehntelang überschattet vom Ruhm und Erfolg des Theoriengebäudes zur Vielfalt von Antikörpern und T-Zellrezeptoren. Inzwischen haben einige wichtige Entdeckungen sie rehabilitiert. Die angeborene Immunität beruht auf einer Reihe von allgemeinen Abwehrmechanismen, die besonders rasche schlagkräftige Reaktionen ermöglichen. Der evolutionäre Vorteil liegt auf der Hand – die prompte Abwehr von krankheitserregenden Mikroben. Die Mechanismen der natürlichen Immunität haben sich im Laufe der Evolution erstaunlich wenig verändert und finden sich schon bei wirbellosen Tieren, darunter Fliegen, und selbst bei Pflanzen.

In den 1980er Jahren wurde bei der Taufliege *Drosophila* ein neues Rezeptorprotein namens Toll untersucht; ist das zugehörige Gen gestört, entwickeln die Embryonen keine Körperunterseite mehr. Dann stellte sich aber heraus, dass dasselbe Molekül an der Abwehr von Pilzinfektionen beteiligt ist. Schließlich konnten Jules Hoffmann von der Universität Straßburg und Charles Janeway von der Yale-University in New Haven (Connecticut) bei Mäusen und Menschen Toll-ähnliche Rezeptoren ▷



PETER COLMAN, WILLIAM TULIP / CSIRO

Die Antigenbindungsstelle eines Antikörpers (rot-blau) gegen ein Molekül des Grippevirus passt perfekt auf die zu erkennende Struktur (gelb).



Dendritische Zellen nehmen Antigene auf, zerlegen sie und präsentieren Bruchstücke auf ihrer Oberfläche. Trägt eine T-Zelle ein Rezeptormolekül, das zu einem dieser Fragmente passt, wird sie aktiviert und vermehrt sich. Einige werden zu T-Killerzellen, andere zu T-Helferzellen. Spezielle Botenstoffe, Cytokine genannt, veranlassen B-Zellen, die freie Antigene erkannt haben, sich zu vermehren und in Plasmazellen zu verwandeln. Diese geben dann Antikörper ab. Produziert eine B-Zelle Antikörper, die mit körpereigenen Molekülen (rote Punkte) reagieren, wird sie eliminiert.

▷ isolieren. Inzwischen ist eine knappes Dutzend solcher Moleküle beschrieben, und vermutlich existieren noch einige mehr.

Jeder Toll-Rezeptor spricht letztlich auf ein molekulares Leitmotiv an, das viele Mikroorganismen gemeinsam haben, beispielsweise auf Komponenten der Zellwand von Bakterien. Ein aktivierter Rezeptor setzt eine Signalkaskade in Gang. Diese regt die Produktion verschiedener Substanzen an: Neben Cytokinen, die unter anderem die Vermehrung und Funktion von Abwehrzellen beeinflussen, entstehen auch kleine Moleküle, die gegen Bakterien, Viren oder Pilze wirken. Ein Beispiel: Anfang der 1980er Jahre isolierte eine schwedische Arbeitsgruppe um Hans Boman an der Universität Stockholm aus einem Schmetterling die Cecropine, eine Familie von kleinen Proteinen mit stark antibakterieller Wirkung. Es handelte sich quasi um eine neuartige Klasse von Antibiotika. Inzwischen sind auch beim Menschen ähnliche Moleküle nachgewiesen.

Die Mechanismen der natürlichen Immunität gewährleisten eine sofortige Reaktion gegen Erreger, die zugleich mit einer Aktivierung der adaptiven Mechanismen einhergeht. Letztere brauchen zwar einige Zeit, um zu greifen, erzeugen aber ein immunologisches Gedächtnis. Beim nächsten Kontakt mit dem gleichen Krankheitserreger kann daher das adaptive Immunsystem rasch und gezielt zurückschlagen. Natürliche und adaptive Immunität bei Säugetieren sind jedenfalls viel stärker miteinander verquickt als je vermutet, aber die Zusammenhänge sind längst noch nicht alle klar.

Die Verzögerung hat jedenfalls einen Grund. In unserem Körper patrouilliert eine immense Zahl von T- und B-Lymphocyten. Diese sind jedoch insgesamt auf so viele verschiedene Antigene spezialisiert, dass jede Zelle normalerweise nur mit wenigen identischen Exemplaren – als kleiner Zellklon – vertreten ist. Sobald eine Zelle ein Antigen erkennt, beginnt sie sich erst einmal zu vervielfältigen, was einige Tage in Anspruch nimmt – daher die Verzögerung der adaptiven Reaktion. Dass das Antigen eine positive Auslese zufällig passender T- und B-Zellklone bewirkt, ist Teil der jahrzehntelang anerkannten Klonselektionstheorie des Australiers McFarlane Burnett. 1999 bestimmte unsere Arbeitsgruppe, wie viel verschiedene T-Zellklone überhaupt im Körper zirkulieren: Beim Menschen waren es 30 Millionen, bei der Maus 2 Millionen. So beeindruckend diese Zahlen auch sind, liegen sie doch weit unter der möglichen Anzahl fremder Peptid-Antigene. Entsprechend kristallisiert sich auch immer deutlicher heraus, dass jeder T-Lymphocyt seine Spezifität den Antigenen anzupassen vermag: Er modifiziert seine Ansprechbarkeit, seine Reaktionsschwelle, gemäß den vorangegangenen Erfahrungen. Damit entfernen wir uns jedoch weit vom klassischen Konzept der spezifischen Erkennung, nach dem Rezeptor und erkanntes Molekül präzise wie Schlüssel und Schloss zusammenpassen müssen.

Hilfreiche Unterdrücker

Viele Immunologen wehrten sich vehement dagegen – und manche tun es noch immer –, die Burnett'sche Theorie der klonalen Selektion aufzugeben. Die Theorie wurde jedoch dadurch ins Wanken gebracht, dass sie keinerlei Raum für natürliche Reaktionen des Immunsystems auf körpereigene Strukturen lässt, also für die so genannte Autoreaktivität. Dabei ist bekannt, dass auch im gesunden Organismus zahlreiche autoreaktive Antikörper und T-Lymphocyten zirkulieren, ja dass die Schulung der T-Zellen im Thymus (dem Organ hinter dem Brustbein, in dem sie ausreifen) sowie ihr Überleben im Organismus ein gewisses Maß an Empfindlichkeit gegenüber körpereigenen Antigenen erfordert. Dass das Immunsystem normalerweise diese nicht angreift, sondern toleriert, lässt sich inzwischen nicht mehr damit erklären, dass autoreaktive B- und T-Lymphocyten schon während der vorgeburtlichen Entwicklung ausgemerzt oder inaktiviert werden.

Hier kommt nun wieder eine andere Gruppe von T-Lymphocyten ins Spiel: die so genannten T-Suppressorzellen. Bereits 1985 hatte Shimon Sakaguchi an der Universität Tokio die Existenz dieses Zelltyps experimentell zweifelsfrei belegt, aber erst vor kurzem wurde diese Erkenntnis »wiederentdeckt« – nachdem die gan-

ze Disziplin Sakaguchis Ergebnis über Jahre entschieden ignoriert hatte. Im Gegensatz zu den T-Helferzellen, deren Aufgabe in der Stimulation von B-Zellen besteht, hemmen die T-Suppressorzellen sowohl B- wie T-Zellen. Diese »unterdrückende« Funktion ist unverzichtbar, wenn eine Immunreaktion beendet werden soll, etwa nach der erfolgreichen Zerstörung eines Krankheitserregers. T-Suppressorzellen erfüllen jedoch noch eine weitere wesentliche Aufgabe: Sie verhindern Autoimmunkrankheiten, indem sie autoreaktive Zellen im Zaum halten.

Das Immunsystem erkennt also körpereigene Antigene genauso wie fremde und erinnert sich an beide. Das ist nur bei einer Organisationsform möglich, die nicht auf strikter Spezifität weniger Antigen-Rezeptor-Interaktionen beruht, sondern auf dem Zusammenwirken einer Vielzahl relativ schwacher und für sich genommen wenig spezifischer Signale, deren Intensität wiederum teilweise von vorangegangenen Ereignissen abhängt. Auf eben dieser Integrationsleistung fußen so kritische Entscheidungen wie die, ob eine Immunreaktion gegen ein bestimmtes Antigen ausgelöst wird.

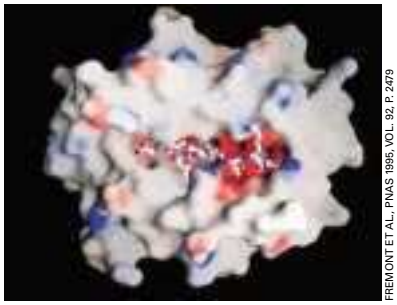
Weitere Erkenntnisse versprechen sich die Immunologen unter anderem von der Genomforschung. Sicher wurde ein Großteil der molekularen Elemente, die an der Erkennung von Antigenen beteiligt sind, bereits vor der Entzifferung des menschlichen Erbguts identifiziert – unter anderem, weil sich ihre Gene auf relativ begrenzte Regionen der Chromosomen konzentrieren. Mit der Kenntnis aller Gene bietet sich aber auch unser Immunsystem für einen integrativen Ansatz an, denn Forscher müssen sich dann nicht mehr damit zufrieden geben, den Körper als »black box« zu befragen, sondern können alle Mitspieler auf molekularer Ebene einbeziehen. Weiteren Fortschritt versprechen bildgebende Verfahren, die bislang eher aus der Hirnforschung bekannt sind. Mithilfe dieser Methoden lassen sich die Aktivitäten des Gehirns von außen verfolgen. Das Immunsystem ist zwar im Gegensatz zum Nervensystem quasi flüssig, und seine Funktion und die Übertragung von Informationen hängen von einem Ballett aus Millionen oder Milliarden beweglicher Zellen ab. Dennoch ist diese dynamische Anatomie den entsprechenden Verfahren dank technischer Fortschritte seit kurzem zugänglich.

Welch enorme Wissenslücken trotz aller Erkenntnisse und Durchbrüche bestehen, zeigt sich an einem wichtigen Aspekt: Wir können das Immunsystem noch immer nur begrenzt für präventive und therapeutische Zwecke manipulieren. Hier Erfolg zu haben, ist nicht nur ein humanitäres Anliegen, sondern auch ein wichtiges Element der wissenschaftlichen Beweisführung. Aber die Wirksamkeit vieler Impfstoffe darf nicht darüber hinwegtäuschen, dass die meisten davon ausschließlich empirisch – durch experimentelles Ausprobieren, nicht durch echte immunologische Intervention – entwickelt wurden. Der empirische Ansatz ist inzwischen ausgereizt. Auf welch erhebliche Schwierigkeiten man damit stößt, zeigt sich deutlich an den bisher fruchtlosen Versuchen zur Entwicklung wirksamer vorbeugender Impfstoffe gegen das Aids-Virus, das Hepatitis-C-Virus und den Malariaerreger.

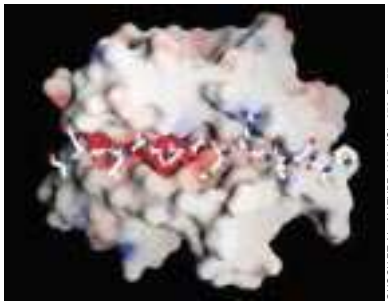
Bald reiche Früchte am medizinischen Zweig

Auch was die Mechanismen der Autoimmunkrankheiten sowie entsprechende Therapien angeht, stehen wir noch ziemlich am Anfang. Selbst die Transplantation von Organen und Blutstammzellen stellt unverändert eine immunologische Herausforderung dar. Ebenfalls nur langsam voran kommt die Immuntherapie gegen Krebs, bei der das Abwehrsystem auf Tumorantigene abgerichtet werden soll; man hinkt hier 15 bis 20 Jahre hinter den anfänglichen Erwartungen hinterher. Damals schon hatten einige monoklonale Antikörper, die im Labor hergestellt wurden, sich als interessant erwiesen. Therapeutische Krebsimpfungen, die darauf zielen, den Patienten durch Aktivierung von spezifischen T-Killerzellen vor Metastasen zu schützen, haben noch nicht die klinische Erprobungsphase III erreicht, wo sie bei einer größeren Anzahl Patienten getestet würden. Die Resultate der vergangenen zehn Jahre sind hierzu leider weniger spektakulär als zunächst erhofft.

Wird die Immunologie also eine sterile Wissenschaft bleiben? Sicherlich nicht. Aber wir haben es mit einem hochkomplexen diffizilen System zu tun. Jeder Anwendungsbereich bringt seine eigenen wissenschaftlichen und klinischen Probleme mit sich. Die entscheidende Frage an dieser Stelle lautet: Haben uns die jüngsten Erkenntnisse – von denen ich hier nur einen Teil angesprochen habe – und die konzeptionellen Weiterentwicklungen so weit vorangebracht, dass in naher Zukunft auch in der Anwendung Fortschritte zu erwarten sind? Oder erahnen wir die wahre Komplexität des Immunsystems noch immer nicht? Ich jedenfalls bin überzeugt, dass die immunologische Forschung schon sehr bald reiche Früchte tragen wird, was Prävention und Therapie von Krankheiten anbelangt. Sollte sich dies bewahrheiten, ist dafür zu sorgen, dass diese Errungenschaften auch den vielen Millionen Kindern und Erwachsenen in ärmeren Ländern zugute kommen. Gerade hier mangelt es an Impfstoffen gegen viele Infektionskrankheiten. ◁



FREMONT ET AL., PNAS 1995, VOL. 92, P. 2479



GHOSH ET AL., NATURE 1995, VOL. 378, P. 457

Ein MHC-Molekül der Klasse I (weißlich, oben) bietet kleine Kostproben (Zickzackkette) von Proteinen an, die im Zellinneren hergestellt werden. Ein Klasse-II-Molekül präsentiert dagegen etwas größere Stücke von aufgenommenen Proteinen (unten).

Philippe Kourilsky hat am Collège de France den Lehrstuhl für molekulare Immunologie inne und ist Direktor des Institut Pasteur in Paris.

Immunologie. Von Charles A. Janeway, Paul Travers, Mark Walport und Mark Shlomchik. Spektrum Akademischer Verlag, 5. Auflage, 2002.

Spezial: Das Immunsystem. Spektrum der Wissenschaft, 3. überarbeitete Neuauflage, 2001.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Das holografische Universum

So merkwürdig es klingt: Aus der Theorie Schwarzer Löcher folgern Forscher, dass das Universum einem gigantischen Hologramm ähneln könnte. Dann wäre die uns vertraute Welt in Wahrheit völlig anders, als wir sie wahrnehmen.

Von Jacob D. Bekenstein

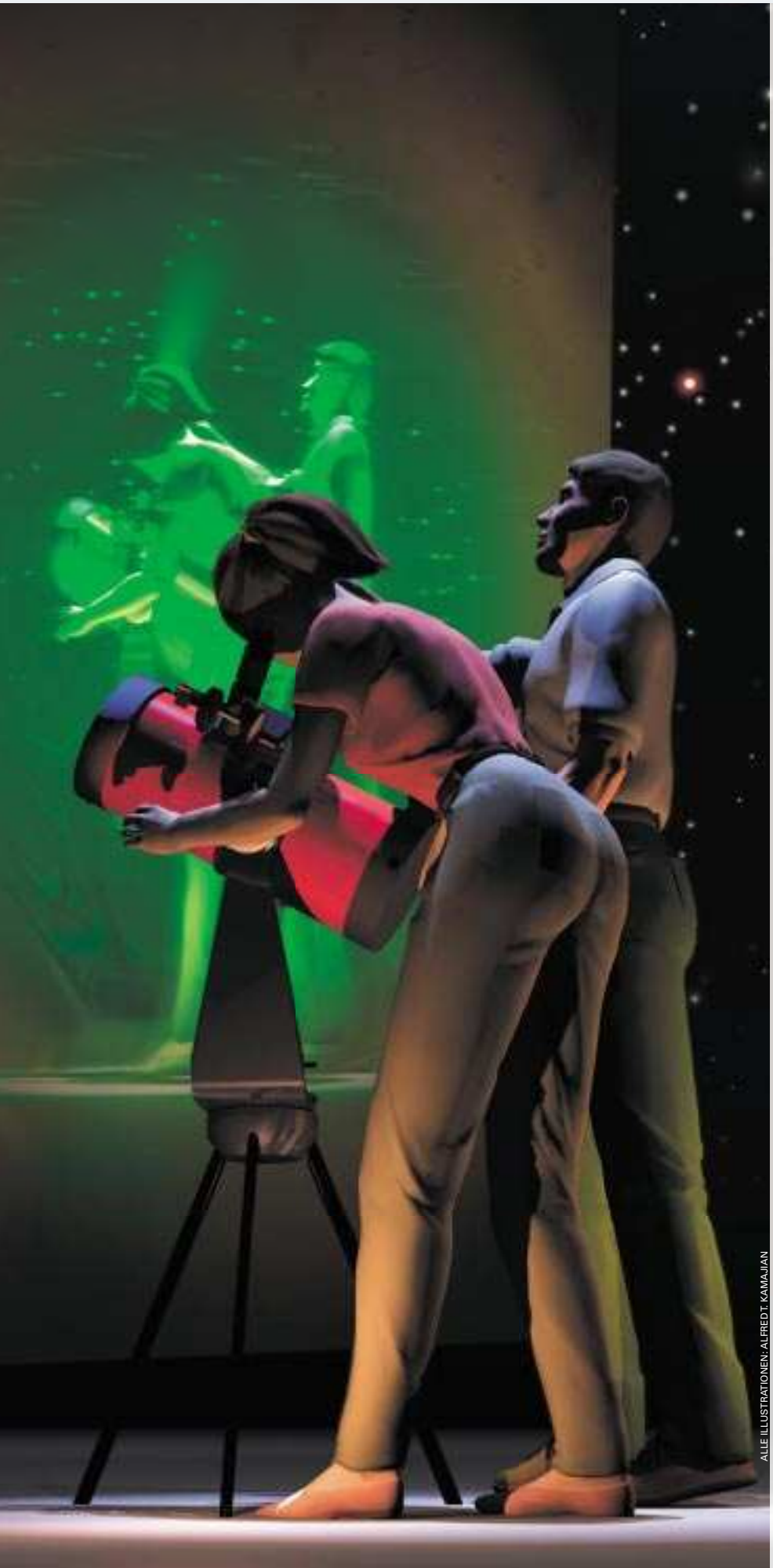
Auf die Frage, woraus unsere physikalische Welt besteht, würden die meisten wohl antworten: aus Materie und Energie. Doch die modernen Errungenschaften in Technik, Biologie und Physik zeigen uns, dass Information ein genauso wichtiger Bestandteil der Welt ist. Der Roboter in der Autofabrik kann auf Vorräte aus Metall und Kunststoff zugreifen – aber er vermag damit nichts anzufangen, wenn ihm nicht ausführliche Anweisungen sagen, welche Teile er in welcher Weise zusammenfügen soll. Ein Ribosom in einer menschlichen Körperzelle verfügt über Aminosäuren als Baumaterial und wird durch die Umwandlung des Energiespeichermoleküls ATP in ADP mit Energie versorgt – aber ohne die Information, die in der DNA des Zellkerns gespeichert ist, vermag es keine Proteine zu synthetisieren. Und auch in der Physik hat uns die Entwicklung der letzten hundert Jahre gezeigt, dass Information in physikalischen Systemen und Prozessen eine entscheidende Rolle spielt. Es gibt sogar eine Interpretation der Quantentheorie, initiiert durch John A. Wheeler von der Universität Princeton, wonach die physikalische Welt eigentlich aus Information besteht, während Energie und Materie nur Oberflächenphänomene sind.

Diese Sicht der Dinge lädt dazu ein, einen neuen Blick auf alte Fragen zu werfen. Die Speicherkapazität von Festplatten und anderen elektronischen Geräten wächst sprunghaft – wann und wo wird dieser Fortschritt enden? Wie hoch ist die ultimative Speicherkapazität eines Geräts, das weniger als ein Gramm wiegt und nicht größer ist als ein Kubikzentimeter – das heißt, etwa so groß wie ein Computerchip? Wie viel Information benötigen wir, um das gesamte Universum zu beschreiben? Könnte diese Beschreibung in den Speicher eines Computers passen? Könnten wir also, wie der englische Dichter William Blake einst schrieb, »die Welt in einem Sandkorn erkennen« – oder ist diese Idee nur eine Ausgeburt dichterischer Freiheit?

Erstaunlicherweise beantworten jüngste Entwicklungen im Bereich der theoretischen Physik tatsächlich einige dieser Fragen – und die Antworten liefern uns vielleicht wichtige Hinweise auf eine umfassende Theorie der Realität. Aus den geheimnisvollen Eigenschaften von Schwarzen Löchern haben Physiker eine absolute Obergrenze für die Information hergeleitet, die in einem Raumgebiet oder in einer bestimmten Materie- und Energiemenge enthalten sein kann. Damit wiederum hängt die Hypothese zusammen, unser Universum, das wir in drei Raumdimensionen wahrnehmen, sei in Wirklichkeit auf eine zweidimensionale Oberfläche »geschrieben« – wie ein Hologramm. Unser alltägliches Erleben einer dreidimensionalen Welt wäre dann entweder eine tiefe Illusion oder nur eine von zwei Alternativen, die Realität zu betrachten. Wenn ein rundes Sandkorn unsere Welt nicht zu umfassen vermag, dann vielleicht ein flacher Bildschirm.

Information als Entropie

Die formale Informationstheorie entstand 1948 mit zwei grundlegenden Veröffentlichungen des amerikanischen Technikers und Mathematikers Claude E. Shannon. Er führte das heute gebräuchlichste Maß für den Informationsgehalt ein: die Entropie. Entropie war seit langem ein zentraler Begriff der Thermodynamik, des Zweiges der Physik, der sich mit Wärme beschäftigt. Anschaulich ausgedrückt ist die thermodynamische Entropie ein Maß für die Unordnung in einem physikalischen System. Präziser definierte der österreichische Physiker Ludwig Boltz-



ALLE ILLUSTRATIONEN: ALFRED T. KAMAJIAN

mann 1877 Entropie durch die Anzahl der unterschiedlichen mikroskopischen Zustände, welche die Teilchen eines Stücks Materie einnehmen können, ohne dass sich dessen makroskopische Eigenschaften verändern. Angewandt auf die Luft in einem Zimmer müsste man – bei vorgegebenen Werten für Druck und Temperatur – alle möglichen Konfigurationen zusammenzählen, welche die einzelnen Gasmoleküle in diesem Zimmer bezüglich Ort und Geschwindigkeit einnehmen können.

Auf der Suche nach einem Maß für den Informationsgehalt einer Nachricht kam Shannon auf eine Formel von der gleichen Gestalt wie Boltzmanns Definition der Entropie. Die Shannon'sche Entropie einer Nachricht ist gleich der Anzahl der binären Ziffern oder Bits, die zu ihrer Kodierung erforderlich sind. Shannons Entropie sagt uns nichts über den Wert einer Information, der ohnehin stark vom Kontext abhängig ist. Doch als objektives Maß für die Menge an Information ist seine Definition in Wissenschaft und Technik ungemein nützlich. Zum Beispiel spielt die Shannon-Entropie für die Entwicklung moderner Kommunikationsgeräte – ob Handys, Modems oder CD-Player – eine wichtige Rolle.

Verwandt und doch verschieden

Thermodynamische und Shannon'sche Entropie sind begrifflich eng verwandt: Der in der Boltzmann-Entropie gesammelten Anzahl möglicher Anordnungen entspricht die Menge an Shannon-Information, die man benötigen würde, um eine spezielle Anordnung zu verwirklichen. Allerdings gibt es zwischen den beiden Entropien deutliche Unterschiede. Erstens drücken Chemiker oder Kühltechniker die thermodynamische Entropie in Einheiten von Energie geteilt durch Temperatur aus, während Informatiker die Shannon-Entropie in dimensionslosen Bits angeben. Dieser Unterschied ist mehr oder weniger eine Frage der Definition.

Doch sogar nach Umformung in gemeinsame Einheiten weichen die typischen Größenordnungen der beiden Entropien enorm voneinander ab. Ein Mikrochip, der ein Gigabyte (10^9 Bytes) an Daten enthält, hat eine Shannon-Entropie von rund 10^{10} Bits, denn ein Byte entspricht acht Bits. Das ist verschwindend wenig gegenüber der thermodynamischen Entropie des Chips, die bei ▷

▷ Raumtemperatur etwa 10^{23} Bits beträgt. Der gigantische Unterschied ergibt sich, weil die beiden Entropien für unterschiedliche Freiheitsgrade berechnet werden. Ein Freiheitsgrad ist jede variable Größe im betrachteten System, also zum Beispiel eine der drei Ortskoordinaten oder eine der drei Geschwindigkeitskomponenten jedes Teilchens.

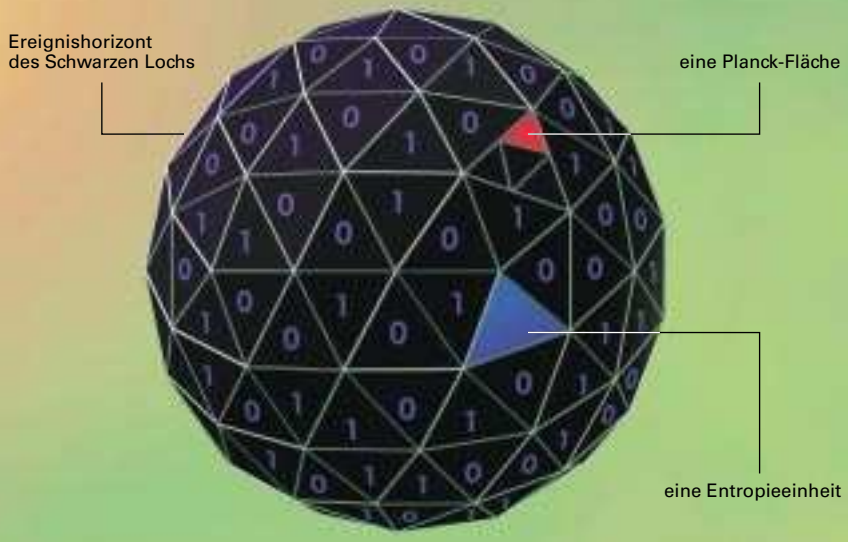
Welches ist die größtmögliche Informationsdichte?

Die Shannon-Entropie des Chips berücksichtigt nur den Gesamtzustand jedes winzigen Transistors, der in den Siliziumkristall geätzt wurde. Der Transistor ist »an« oder »aus«, im Zustand Null oder Eins: Er hat einen einzigen binären Freiheitsgrad. Die thermodynamische Entropie hingegen hängt von den Zuständen all der Milliarden Atome und freien Elektronen ab, aus denen jeder Transistor sich zusammensetzt. Mit jedem Miniaturisierungsschritt rückt allerdings der Tag ein wenig näher, an dem jedes Atom für uns ein Bit Information zu speichern vermag – und zugleich nähert sich die nutzbare Shannon-Entropie des jeweils modernsten Mikrochips allmählich der thermodynamischen Entropie des Materials. Wenn beide Entropien für dieselben Freiheitsgrade berechnet werden, sind sie gleich groß.

Was aber sind die ultimativen Freiheitsgrade? Atome sind aus Elektronen und Kernen aufgebaut, Kerne aus Protonen und Neutronen, und diese wiederum aus Quarks. Viele Physiker glauben heute, dass Elektronen und Quarks Anregungszustände so genannter Superstrings sind, und vermuten, dies seien die fundamentalsten Bausteine der Natur. Doch die Wechselfälle eines Jahrhunderts physikalischer Entdeckungen sollten uns vor Dogmatismus warnen: Es könnte im Universum mehr Strukturebenen geben, als unsere physikalische Schulweisheit sich träumen lässt.

Die ultimative Informationskapazität eines Stücks Materie – mit anderen Worten, seine wahre thermodynamische Entropie – kann nicht berechnet werden, solange das Wesen der ultimativen Bestandteile der Materie oder der tiefsten Strukturebene nicht bekannt ist. Diese Unkenntnis verursacht in der praktischen Thermodynamik keine Probleme. Für die Analyse eines Automotors spielen die Eigenschaften der Quarks keine Rolle, denn unter den relativ friedlichen Bedingungen eines Verbrennungsmotors verändern sie ihren Zustand nicht. Doch angesichts des atemberaubenden Fortschritts der Miniaturisierung kann man sich rein theoretisch den Tag ausmalen, an dem die Quarks als Informationsspeicher dienen werden – vielleicht ein Bit pro Quark. Wie viel Information würde dann in einen Kubikzentimeter passen? Und wie viel erst, wenn wir Superstrings oder noch tiefere, bislang nicht einmal hypothetisch angedachte Ebenen nutzen könnten? Überraschenderweise hat die Entwicklung der Gravitationsphysik in den letzten drei Jahrzehnten auf diese scheinbar verstiegenen Fragen eine Reihe von klaren Antworten geliefert.

Der Ereignishorizont als Informationsträger



Die Entropie eines Schwarzen Lochs ist proportional zur Fläche des Ereignishorizonts – das heißt zur Oberfläche des Bereichs, in dem nicht einmal Licht der Gravitationsanziehung des Lochs zu entkommen vermag. Ein Schwarzes Loch mit einer Horizontfläche von A Planck-Flächen hat eine Entropie von $A/4$. Die Planck-Fläche beträgt rund 10^{-66} Quadratzentimeter und ist die fundamentale Quanteneinheit der Fläche, gegeben durch die Gravitationskonstante, die Lichtgeschwindigkeit und das Planck'sche Elementarquantum. Wird die Entropie des Schwarzen Lochs als Information interpretiert, die auf dem Ereignishorizont gespeichert ist, so entspricht jede Informationseinheit – jedes Bit mit dem Wert 0 oder 1 – vier Planck-Flächen.

Schwarze Löcher kommen ins Spiel

Eine zentrale Rolle in dieser Entwicklung spielen die Schwarzen Löcher. Ihre Existenz folgt aus der Allgemeinen Relativitätstheorie, der von Albert Einstein 1915 formulierten geometrischen Beschreibung der Gravitation. In dieser Theorie ist die Schwerkraft letztlich nichts anderes als eine Krümmung der Raumzeit, wodurch Objekte sich so bewegen, als wirke eine Kraft auf sie. Diese Krümmung wird ihrerseits durch die Anwesenheit von Materie und Energie verursacht. Gemäß Einsteins Gleichungen krümmt eine ausreichend dichte Ansammlung von Materie oder Energie die Raumzeit so stark, dass sie förmlich zerreißt und ein Schwarzes Loch bildet. Die Gesetze der Relativitätstheorie verbieten, dass irgendetwas, das in ein Schwarzes Loch gefallen ist, jemals wieder herauskommt – zumindest im Rahmen der klassischen Physik, das heißt ohne Berücksichtigung von Quanteneffekten. Die kritische Grenze des Bereichs, aus dem es kein Entkommen gibt, heißt Ereignishorizont. Im einfachsten Fall ist er eine Kugelfläche, deren Radius desto größer ist, je mehr Masse das Schwarze Loch besitzt.

Es ist unmöglich herauszufinden, was innerhalb eines Schwarzen Lochs vorgeht. Keinerlei Information kann den Ereignishorizont verlassen und in die Außenwelt entkommen. Doch wenn ein Stück Materie für immer in einem Schwarzen Loch verschwindet, hinterlässt es gewisse Spuren. Seine Energie – jede Masse entspricht gemäß Einsteins

Formel $E = mc^2$ einer Energie und umgekehrt – macht sich dauerhaft als Massenzunahme des Schwarzen Lochs bemerkbar. Wird Materie eingefangen, während sie das Schwarze Loch umkreist, so kommt ihr Drehimpuls zu dem des Schwarzen Lochs hinzu. Sowohl Masse als auch Drehimpuls eines Schwarzen Lochs lassen sich anhand der Wirkung auf die umgebende Raumzeit messen.

Auf diese Weise sind auch Schwarze Löcher den Gesetzen der Energie- und Drehimpulserhaltung unterworfen. Aber ein anderes fundamentales Gesetz, der Zweite Hauptsatz der Thermodynamik, scheint verletzt zu werden.

Entropie geht niemals verloren

Der Zweite Hauptsatz drückt die alltägliche Beobachtung aus, dass die meisten Naturvorgänge irreversibel sind: Eine Teetasse fällt vom Tisch und zerbricht, aber niemand hat jemals Scherben gesehen, die von selbst in die Höhe springen und sich zu einer Teetasse zusammensetzen. Der Zweite Hauptsatz der Thermodynamik verbietet solche Umkehrprozesse. Er besagt, dass die Entropie eines abgeschlossenen physikalischen Systems niemals abnehmen kann; sie kann bestenfalls konstant bleiben, doch meistens nimmt sie zu. Diese Aussage ist nicht nur grundlegend für die physikalische Chemie und die Ingenieurwissenschaften, sondern vielleicht das physikalische Gesetz mit der größten Bedeutung außerhalb der Physik.

Wie Wheeler als Erster betonte, verschwindet mit der Materie auch ihre Entropie auf Nimmerwiedersehen im Schwarzen Loch und der Zweite Hauptsatz scheint außer Kraft gesetzt zu sein. Den Schlüssel zur Lösung dieses Rätsels lieferten 1970 unabhängig voneinander Demetrious Christodoulou, damals Student bei Wheeler in Princeton, und Stephen W. Hawking von der Universität Cambridge (England). Sie bewiesen, dass bei verschiedenen Prozessen, etwa bei der Verschmelzung Schwarzer Löcher, die Gesamtfläche der Ereignishorizonte niemals abnimmt. Die Analogie zur Tendenz der Entropie, mit der Zeit anzuwachsen, brachte mich 1972 auf die Idee, dass ein Schwarzes Loch eine Entropie besitzt, die proportional zur Fläche seines Ereignishorizonts ist (siehe Kasten auf der linken Seite).

Wie ich mutmaßte, wird beim Sturz von Materie in ein Schwarzes Loch ihre »verlorene« Entropie stets durch die Zunahme der Entropie des Schwarzen Lochs kompensiert oder gar überkompensiert. Allgemeiner formuliert: Die Summe der Entropien Schwarzer Löcher plus der gewöhnlichen Entropie außerhalb der Schwarzen Löcher kann nicht abnehmen. Dies ist der Verallgemeinerte Zweite Hauptsatz. Er hat eine Reihe strenger Tests – wenngleich rein theoretischer Natur – bestanden.

Eine neue universelle Grenze

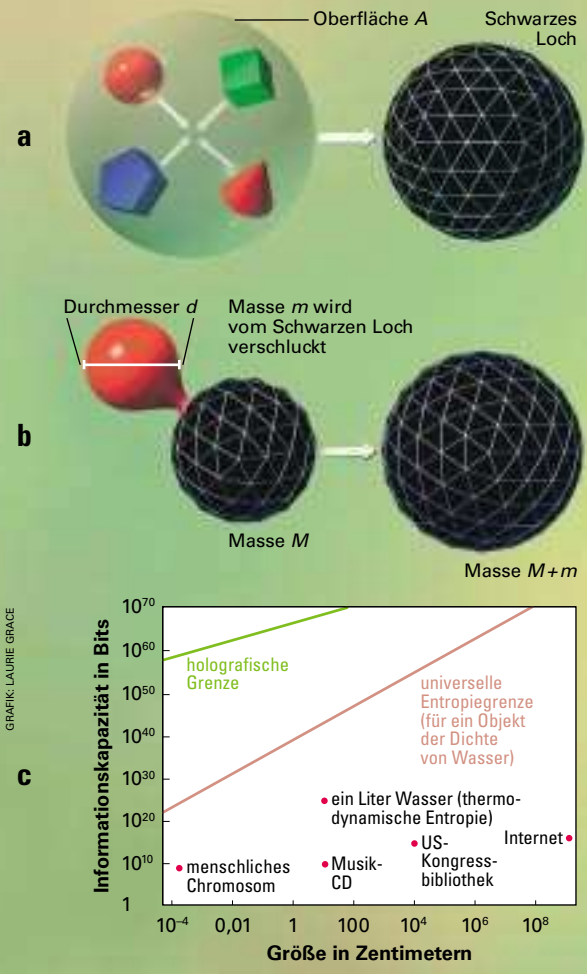
Wenn ein Stern zu einem Schwarzen Loch kollabiert, übertrifft dessen Entropie jene des Sterns bei weitem. 1974 zeigte Hawking, dass Schwarze Löcher auf Grund von Quanteneffekten spontan thermische Strahlung aussenden, die so genannte Hawking-Strahlung. Das Christodoulou-Hawking-Theorem versagt angesichts dieses Phänomens, denn die Masse des Schwarzen Lochs nimmt durch das Abstrahlen von Energie ab, und damit schrumpft auch sein Ereignishorizont. Der Verallgemeinerte Zweite Hauptsatz hat hingegen kein Problem mit der Hawking-Strahlung: Durch die Entropie der frei werdenden Strahlung wird die Abnahme der Entropie des Schwarzen Lochs mehr als kompensiert.

Im Jahre 1986 betrachtete Rafael D. Sorkin von der Universität Syracuse (US-Bundesstaat New York) die Eigenschaft des Ereignishorizonts, jede Information im Inneren eines Schwarzen Lochs daran zu hindern, die Ereignisse außerhalb zu beeinflussen. Er folgerte daraus, dass der Verallgemeinerte Zweite Hauptsatz – oder ein sehr ähnliches Gesetz – für jeden denkbaren Prozess gelten muss, den Schwarze Löcher durchlaufen können. Sorkins tiefgründige Überlegung macht klar, dass die Entropie, die in den Verall- ▷

IN KÜRZE

- **Das holografische Prinzip** besagt, dass das Universum einem Hologramm gleicht – einem dreidimensionalen Bild, das auf einem flachen Film gespeichert ist. Ebenso könnte unser dreidimensionaler Kosmos vollständig äquivalent zu alternativen Quantenfeldern und physikalischen Gesetzen sein, die auf einer weit entfernten riesigen Fläche ihr Spiel treiben.
- **Schwarze Löcher** – unvorstellbar dichte Materieansammlungen – liefern einen Hinweis, dass dieses Prinzip tatsächlich gelten könnte. Aus der Theorie Schwarzer Löcher folgt, dass der maximale Entropie- oder Informationsgehalt eines beliebigen Raumgebiets nicht vom Volumen, sondern von der Oberfläche des Gebiets abhängt.
- **Physiker** hoffen, dass dieses überraschende Resultat ein Schlüssel zur ultimativen Theorie der Realität ist.

Grenzen der Informationsdichte



GRAFIK: LAURIE GRACE

Aus der Thermodynamik Schwarzer Löcher lassen sich Obergrenzen für die Entropie- oder Informationsdichte unter verschiedenen Bedingungen herleiten.

▶ **Die holografische Grenze** gibt an, wie viel Information in einem gegebenen Raumgebiet enthalten sein kann. Man betrachtet eine Materieansammlung, die in eine Kugel der Oberfläche A passt und zu einem Schwarzen Loch kollabiert *(a)*. Die Horizont-Oberfläche des Schwarzen Lochs muss kleiner als A sein, seine Entropie somit kleiner als $A/4$ (siehe Kasten auf der vorigen Doppelseite). Da die Entropie nicht abnehmen kann, muss auch die ursprüngliche Materieverteilung weniger als $A/4$ Entropie- oder Informationseinheiten enthalten haben. Das bedeutet, dass der maximale Informationsgehalt eines Raumgebiets durch dessen Oberfläche festgelegt wird – entgegen der nahe liegenden Annahme, die Speicherkapazität eines Gebiets hänge von seinem Volumen ab.

▶ **Die universelle Entropiegrenze** gibt an, wie viel Information in einer kugelförmigen Masse m vom Durchmesser d enthalten sein kann. Man nimmt an, dass diese Masse von einem nicht viel größeren Schwarzen Loch verschluckt wird *(b)*. Die Größenzunahme des Schwarzen Lochs definiert eine Obergrenze für die Entropie der verschluckten Masse. Diese Grenze ist enger als die holografische Grenze; nur wenn die kugelförmige Masse selbst schon fast so dicht ist wie ein Schwarzes Loch, sind beide Grenzen äquivalent.

▶ **Sowohl die holografische als auch die universelle** Informationsgrenze liegen weit jenseits der Speicherkapazität heutiger Datentechnik. Auch die Informationsdichte von Chromosomen oder die thermodynamische Entropie von Wasser kommt bei weitem nicht an diese Grenzen heran *(c)*.

▷ gemeinerten Zweiten Hauptsatz eingeht, tatsächlich alle möglichen Konfigurationen bis zur fundamentalsten Ebene der Materiestruktur umfasst – ganz unabhängig davon, wie diese Ebene letztlich aussehen mag.

Aus der Hawking-Strahlung lässt sich die Proportionalitätskonstante zwischen der Entropie Schwarzer Löcher und der Fläche ihres Ereignishorizonts bestimmen: Die Entropie eines Schwarzen Lochs ist exakt gleich einem Viertel seiner Horizontfläche, gemessen in Planck-Flächen. Die Planck-Länge ist die fundamentale Längeneinheit für Gravitation und Quantenmechanik; sie beträgt 10^{-33} Zentimeter. Die Planck-Fläche ist das Quadrat der Planck-Länge, also 10^{-66} Quadratzentimeter. Selbst nach den Maßstäben der Thermodynamik ergeben sich daraus immense Entropiewerte. Die Entropie eines Schwarzen Lochs von nur einem Zentimeter Durchmesser würde 10^{66} Bits betragen – das entspricht der thermodynamischen Entropie eines Wasserwürfels mit zehn Milliarden Kilometern Kantenlänge.

Der Verallgemeinerte Zweite Hauptsatz erlaubt uns, für die Informationskapazität jedes abgeschlossenen physikalischen Systems Obergrenzen zu bestimmen, die für die gesamte Information auf allen Strukturebenen – selbst auf den bislang unentdeckten – gelten. 1980 begann ich die erste derartige Grenze zu untersuchen, die so genannte universelle Entropie-Grenze. Sie gibt an, wie viel Entropie in einer gegebenen Masse von gegebener Ausdehnung maximal enthalten sein kann (siehe Kasten oben).

Die Welt als Hologramm

Leonard Susskind von der Universität Stanford hatte 1995 eine ähnliche Idee, die so genannte holografische Grenze. Sie bezeichnet die maximale Entropiemenge in einem gegebenen Volumen, das Materie und Energie enthält.

In seiner Arbeit zur holografischen Grenze betrachtete Susskind eine beliebige annähernd kugelförmige isolierte Masse, die selbst kein Schwarzes Loch ist und in eine geschlossene Fläche der Größe A hineinpasst. Wenn die Masse zu einem Schwarzen Loch kollabieren kann, ist dessen Horizontfläche kleiner als A und die Entropie des Schwarzen Lochs folglich kleiner als $A/4$. Da nach dem Verallgemeinerten Zweiten Hauptsatz die Entropie des Systems nicht abnehmen darf, kann die ursprüngliche Entropie der Masse nicht größer als $A/4$ gewesen sein. Daraus ergibt sich, dass die Entropie eines abgeschlossenen Systems mit Grenzfläche A kleiner als $A/4$ sein muss.

Was aber, wenn die Masse nicht spontan kollabiert? Wie ich 2000 zeigte, kann ein winziges Schwarzes Loch verwendet werden, um das System in ein Schwarzes Loch zu verwandeln, das sich kaum von demjenigen in Susskinds Überlegung unterscheidet. Die Grenze

ist somit unabhängig von der Zusammensetzung des Systems oder dem Wesen der fundamentalsten Naturbausteine. Sie hängt ausschließlich vom Verallgemeinerten Zweiten Hauptsatz ab.

Damit können wir nun einige der kniffligen Fragen über die ultimativen Grenzen der Informationskapazität beantworten: Ein Gerät mit einem Zentimeter Durchmesser kann im Prinzip bis zu 10^{66} Bits speichern – eine unvorstellbare Menge. Das sichtbare Universum enthält mindestens 10^{100} Bits Entropie, die sich also im Prinzip in einer Kugel von einem zehntel Lichtjahr Durchmesser unterbringen ließen. Doch da es schwierig ist, die Entropie des Universums zu schätzen, sind viel größere Werte durchaus plausibel; sie könnten eine Kugel erfordern, die fast so groß ist wie das Universum selbst.

Schwarzes Loch aus Speicherchips

Ein Aspekt der holografischen Grenze ist besonders erstaunlich: Die maximal mögliche Entropie hängt von der Grenzfläche ab statt vom Volumen. Angenommen, wir türmen Speicherchips zu einem großen Haufen. Die Anzahl der Transistoren – die gesamte Speicherkapazität – wächst mit dem Volumen des Haufens.

Dasselbe gilt für die gesamte thermodynamische Entropie aller Chips. Doch erstaunlicherweise wächst die theoretische ultimative Informationskapazität des Volumens, das der Haufen erfüllt, nur mit der Größe der Oberfläche. Da das Volumen schneller wächst als die Oberfläche, muss die Gesamtentropie der Chips irgendwann die holografische Grenze überschreiten. Wie es scheint, versagt dann entweder der Verallgemeinerte Zweite Hauptsatz oder unsere Vorstellungen von Entropie und Informationskapazität brechen zusammen. Tatsächlich aber ist es der Haufen selbst, der zusammenbricht: Er kollabiert vor Erreichen der kritischen Größe unter seiner eigenen Schwerkraft zu einem Schwarzen Loch. Danach vergrößert jeder weitere Speicherchip die Masse und die Horizontfläche des Schwarzen Lochs, wie es sich nach dem Verallgemeinerten Zweiten Hauptsatz gehört.

Der überraschende Befund, dass die Informationskapazität von der Größe der Oberfläche abhängt, findet seine natürliche Erklärung im »holografischen Prinzip«, das der Nobelpreisträger Gerard 't Hooft von der Universität Utrecht (Niederlande) 1993 aufstellte und das Susskind weiterentwickelte. In unserer Alltagswelt ist ein Hologramm eine spezielle Art von Fotografie, die ein dreidimensionales Bild erzeugt, wenn man sie in der richtigen Weise beleuchtet. Die gesamte zur Beschreibung der dreidimensionalen Szene nötige Information ist als Muster heller und dunkler Gebiete auf dem zweidimensionalen Film kodiert. Das holografische Prinzip besagt, dass etwas Analoges für die komplette physikalische Beschreibung eines beliebigen Systems gilt, das in einem dreidimensionalen Gebiet liegt. Es gibt demnach eine andere, nur auf der zweidimensionalen Grenzfläche des Gebiets definierte physikalische Theorie, welche die dreidimensionale Physik vollständig beschreibt. Wenn sich ein dreidimensionales System vollständig durch eine physikalische Theorie ausdrücken lässt, die nur auf dessen zweidimensionaler Grenze operiert, dann sollte der Informationsgehalt des Systems nicht größer sein als derjenige der Beschreibung auf der Grenzfläche.

Das All als Randerscheinung

Können wir das holografische Prinzip auf das Universum als Ganzes anwenden? Das wirkliche Universum ist ein vierdimensionales System: Es hat ein räumliches Volumen und erstreckt sich in der Zeit. Wenn die Physik des Universums holografisch ist, dann muss eine alternative, auf einer dreidimensionalen Grenze der Raumzeit gültige Menge physikalischer Gesetze existieren, die zu der uns bekannten vierdimensionalen Physik äquivalent ist. Noch kennen wir keine dreidimensionale Theorie, die so etwas leistet. Und was sollte uns als Grenze des Universums dienen? Ein erster Schritt zur Prüfung dieser Ideen ist das Studium von vereinfachten Modellen des Universums. ▷

Wenn Computerchips kollabieren

Der Informationsgehalt einer immer größeren Anhäufung von Computerchips wächst offensichtlich mit der Anzahl der Chips – und zugleich mit dem Volumen, das der Haufen einnimmt. Diese simple Regel muss aber für eine genügend große Chip-Ansammlung versagen. Andernfalls würde die Information schließlich über die holografische Grenze hinaus wachsen – denn diese Grenze hängt nicht vom Volumen ab, sondern von der Oberfläche. Tatsächlich stößt die Volumen-Regel an ihre Grenze, wenn der Chiphaufen so riesig wird, dass er unter seiner eigenen Masse zusammenbricht. Er bildet dann ein Schwarzes Loch – und für Schwarze Löcher gilt, dass ihr Informationsgehalt von der Oberfläche abhängt.

▷ Ein Beispiel für solche Modelle sind die so genannten Anti-de-Sitter-Raumzeiten. Der holländische Astronom Willem de Sitter entwickelte 1917 das ursprüngliche De-Sitter-Modell als Lösung der Einstein'schen Gleichungen mit einer zusätzlichen abstoßenden Kraft, der »kosmologischen Konstanten«. Die De-Sitter-Raumzeit ist leer, hochgradig symmetrisch und dehnt sich beschleunigt aus. 1997 schlossen Astronomen aus der Untersuchung ferner Supernova-Explosionen, dass sich die Expansion unseres Universums beschleunigt (Spektrum der Wissenschaft 3/2001, S. 30). Wahrscheinlich wird unser Kosmos darum künftig immer mehr einem De-Sitter-Modell ähneln. Ersetzt man nun in den Einstein'schen Gleichungen die Abstoßung durch eine Anziehung, so erhält man die ebenso symmetrische Anti-de-Sitter-Raumzeit. Wichtig für das holografische Prinzip ist, dass diese Raumzeit eine Begrenzung hat, die »im Unendlichen« liegt und große Ähnlichkeit mit unserer gewöhnlichen Raumzeit aufweist.

In wie viel Dimensionen leben wir?

Mit Hilfe der Anti-de-Sitter-Raumzeit haben Theoretiker ein konkretes Beispiel für die Wirkung des holografischen Prinzips entwickelt: Ein mittels Superstring-Theorie beschriebenes Universum mit Anti-de-Sitter-Raumzeit ist völlig äquivalent zu einer Quantenfeldtheorie, die auf der Begrenzung dieser Raumzeit operiert (siehe Kasten unten). Somit wird die komplette Superstring-Theorie in einem Anti-de-Sitter-Universum vollständig auf die Begrenzung dieser Raumzeit abgebildet. 1997 vermutete Juan Maldacena, der damals an der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts) tätig war, erstmals eine solche Beziehung für den Fall eines fünfdimensionalen Anti-de-Sitter-Modells. Später bestätigten Edward Witten vom Institute for Advanced Study in Princeton sowie Steven S. Gubser, Igor R. Klebanov und Alexander M. Polyakov von der Universität Princeton diese Vermutung und fanden weitere Beispiele für das holografische Prinzip bei Raumzeiten unterschiedlichster Dimensionen.

Das bedeutet, dass zwei scheinbar völlig verschiedene Theorien – die nicht einmal in Räumen derselben Dimensionszahl gelten – äquivalent sind. Intelligente Bewohner eines dieser Universen könnten nicht unterscheiden, ob sie in einem fünfdimensionalen, von einer Stringtheorie beschriebenen Kosmos leben oder in einer vierdimensionalen Welt, auf die eine Quantenfeldtheorie mit punktförmigen Teilchen zutrifft. Natürlich könnte ihnen die Struktur ihres Gehirns ein massives Vorurteil zugunsten einer dieser Beschreibungen aufdrängen – so wie unser angeborener »gesunder Menschenverstand« die Wahrnehmung konstruiert, dass unser Universum drei räumliche Dimensionen besitzt (siehe Kasten rechts).

Die holografische Äquivalenz lässt sich im Prinzip nutzen, um ein kompliziertes Problem – etwa das Verhalten von Quarks und Gluonen – zu vereinfachen, indem es von der vierdimensionalen Grenz-Raumzeit in die hochgradig symmetrische fünfdimensionale Anti-de-Sitter-Raumzeit verlegt wird. Das funktioniert auch umgekehrt. So konnte Witten zeigen, dass ein Schwarzes Loch in einer Anti-de-Sitter-Raumzeit sich in heiße Strahlung verwandelt, wenn man zur alternativen Physik auf der Grenz-Raumzeit übergeht. Die Entropie des Schwarzen Lochs – immer noch ein zutiefst mysteriöser Begriff – geht dabei in die wohl bekannte Entropie der Strahlung über.

Die holografische Grenze des unendlichen Universums

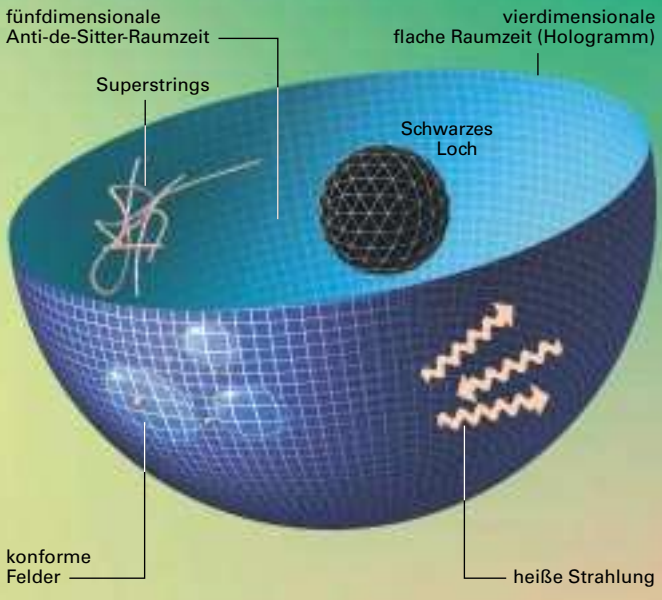
Hochsymmetrisch, leer und fünfdimensional – das Anti-de-Sitter-Universum ähnelt kaum unserem vierdimensionalen Kosmos, der höchst ungleichmäßig von Materie und Strahlung erfüllt ist. Selbst wenn wir unser Universum durch ein Modell mit homogener Verteilung von Materie und Strahlung approximieren, erhalten wir kein Anti-de-Sitter-, sondern ein Friedmann-Robertson-Walker-Universum: Dieses Universum ist unendlich, hat keine Begrenzung und wird ewig weiterexpandieren.

Entspricht ein solches Universum dem holografischen Prinzip oder der holografischen Grenze? Susskinds Überle-

Ein holografisches Modell der Raumzeit

Das holografische Prinzip stellt völlige Äquivalenz zwischen zwei Universen her, die unterschiedliche Dimensionen haben und unterschiedlichen physikalischen Gesetzen gehorchen. Theoretiker haben dieses Prinzip mathematisch für einen speziellen Typ fünfdimensionaler Raumzeit (»Anti-de-Sitter«) und ihre vierdimensionale Grenze bewiesen. Das fünfdimensionale Universum wird praktisch wie ein Hologramm auf seiner vierdimensionalen Grenzfläche abgebildet. In der fünfdimensionalen Raumzeit herrscht die Superstringtheorie, aber auf dem vierdimensionalen Hologramm gilt eine so genannte konforme Feldtheorie mit Punktteilchen.

Ein Schwarzes Loch in der fünfdimensionalen Raumzeit ist äquivalent zu heißer Strahlung auf dem Hologramm. Insbesondere haben das Loch und die Strahlung dieselbe Entropie, obwohl der physikalische Ursprung der Entropie in beiden Fällen völlig verschieden ist. Zwar scheinen diese beiden Beschreibungen des Universums nicht das Geringste gemeinsam zu haben, aber dennoch vermag prinzipiell kein Experiment zwischen ihnen zu unterscheiden.



Sind wir Flachlandbewohner?

Unsere angeborene Wahrnehmung teilt uns mit, dass wir in einer dreidimensionalen Welt leben. Doch wenn wir das holografische Prinzip beim Wort nehmen, handelt es sich dabei um eine hartnäckige Einbildung: In Wahrheit leben wir in einem flächigen Universum.

gung, die auf dem Kollaps eines Schwarzen Lochs beruht, hilft uns da nicht weiter. Die von Schwarzen Löchern abgeleitete holografische Grenze muss in einem homogenen, expandierenden Universum zusammenbrechen. Die Entropie eines gleichmäßig von Materie und Strahlung erfüllten Gebiets ist proportional zu seinem Volumen. Ein genügend großes Gebiet wird darum die holografische Grenze verletzen.

1999 schlug Raphael Bousso, der damals an der Stanford-Universität forschte, eine modifizierte holografische Grenze vor, die – wie sich inzwischen gezeigt hat – auch in Situationen funktioniert, in denen die zuvor definierten Grenzen versagen.

Limits der Entropie

Boussos Überlegung beginnt mit irgendeiner geeigneten zweidimensionalen Fläche; sie kann kugelförmig geschlossen sein oder offen wie ein Blatt Papier. Von einer Seite dieser Fläche geht nun – von allen Punkten gleichzeitig und senkrecht zu der Fläche – ein kurzer Lichtpuls aus. Verlangt wird nur, dass die Lichtstrahlen zunächst konvergieren. Beispielsweise erfüllt von der Innenfläche einer Kugel abgestrahltes Licht diese Bedingung. Nun betrachtet man die Entropie der Energie und Materie, die von den imaginären Lichtstrahlen durchquert werden – aber nur bis sie beginnen, sich zu überschneiden. Bousso vermutete, dass diese Entropie nicht größer sein kann als die Entropie der ursprünglichen Fläche – also ein Viertel dieser Fläche in Planck-Einheiten. Dies ist eine andere Methode, die Entropie zu bestimmen, als die ursprüngliche holografische Grenze. Boussos Grenze bezieht sich nicht auf die Entropie einer ganzen Region zu einem bestimmten Zeitpunkt, sondern auf die Summe lokaler Entropien zu verschiedenen Zeiten: Gezählt werden alle Teilregionen, die vom Lichtblitz der Oberfläche »beleuchtet« werden.

Boussos Grenze enthält andere Entropie-Limits als Spezialfälle, vermeidet aber deren Nachteile. Sowohl die universelle Entropie-Grenze als auch die holografische Grenze nach 't Hooft und Susskind können für isolierte Systeme, die sich nicht schnell verändern und keine starken Gravitationsfelder enthalten, aus der Bousso-Grenze abgeleitet werden. Wenn diese einschränkenden Bedingungen verletzt werden – etwa im Fall einer kollabierenden Materiekugel, die sich bereits innerhalb eines Schwarzen Lochs befindet –, dann versagen diese Grenzen, während Boussos Grenze weiterhin gilt. Außerdem hat Bousso gezeigt, dass sich mit seiner Strategie die zweidimensionalen Flächen ausfindig machen lassen, auf denen Hologramme der Welt untergebracht werden können.

Forscher haben noch viele andere Entropie-Limits vorgeschlagen. Gerade die Vielfalt an Variationen über das holografische Thema zeigt, dass es noch längst nicht den Status eines physikalischen Gesetzes erreicht hat. Doch obwohl wir die holografische Denkweise noch nicht ganz verstehen, scheint sie durchaus Zukunft zu haben. Wenn das so ist, muss der seit fünfzig Jahren herrschende Glaube, die Feldtheorie sei die ultimative Sprache der Physik, neuen Ideen weichen.

Skizzen einer diskreten Theorie

Ein Feld wie das elektromagnetische variiert kontinuierlich von Punkt zu Punkt und enthält darum unendlich viele Freiheitsgrade. Auch in Superstring-Theorien ist die Zahl der Freiheitsgrade unendlich. Doch die Holografie beschränkt die Freiheitsgrade innerhalb einer Grenzfläche auf eine endliche Anzahl; folglich kann die Feldtheorie mit ihren Unendlichkeiten nicht das letzte Wort sein. Und selbst wenn diese Unendlichkeiten zu zähmen sind, muss künftig die rätselhafte Abhängigkeit der Information von der Oberflächengröße berücksichtigt werden.

Vielleicht weist uns die Holografie den Weg zu einer fundamentalen Theorie. Wie könnte sie aussehen? Einige Forscher, insbesondere Lee Smolin vom Perimeter Institute for Theoretical Physics in Waterloo (Kanada), schließen aus dem holografischen Ansatz, dass eine endgültige Theorie sich weder mit Feldern befassen wird noch mit Objekten in der Raumzeit, sondern mit dem Informationsaustausch zwischen physikalischen Prozessen. Dies wäre der endgültige Triumph der Idee, dass die Welt aus Information besteht. ◁

Jacob D. Bekenstein hat wichtige Beiträge zur Thermodynamik Schwarzer Löcher und zum Zusammenhang zwischen Information und Schwerkraft geleistet. Er ist Professor für Theoretische Physik an der Hebräischen Universität Jerusalem. Bekenstein widmet diesen Artikel John Archibald Wheeler, der vor dreißig Jahren sein Doktorvater war.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Das Universum in der Nussschale. Von Stephen W. Hawking und Markus Pössel. Deutscher Taschenbuch Verlag, 2003.

Warum gibt es die Welt? Die Evolution des Kosmos. Von Lee Smolin. Deutscher Taschenbuch Verlag, München 2002.

Das Informationsparadoxon bei Schwarzen Löchern. Von Leonard Susskind in: Spektrum der Wissenschaft 6/1997, S. 58.

Three Roads to Quantum Gravity. Von Lee Smolin. Basic Books, 2002.

Schneller satt

Der Mikrowellenherd

Von Bernhard Gerl

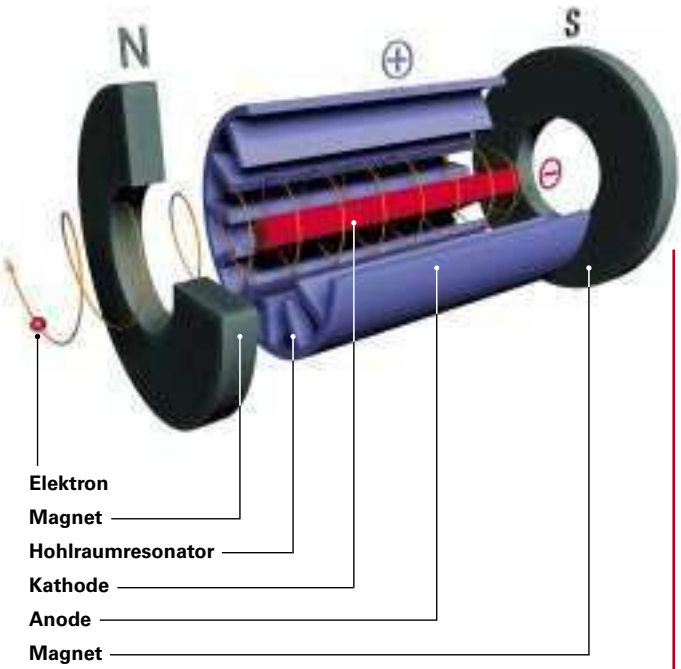
Mikrowellen sind elektromagnetische Strahlen im Frequenzbereich von 1 bis 1000 Gigahertz. In Herden nutzt man 2,45 GHz – das elektromagnetische Feld schwingt 2,45-milliardenmal in der Sekunde; dies entspricht in Luft einer Wellenlänge von 12,25 Zentimetern. Moleküle, die an einem Ende »etwas negativer« und am anderen »etwas positiver« geladen sind wie zum Beispiel Wasser, beginnen in einem solchen Wechselfeld ebenfalls zu schwingen. Diese verstärkte Molekülbewegung ist direkt als Temperaturerhöhung messbar.

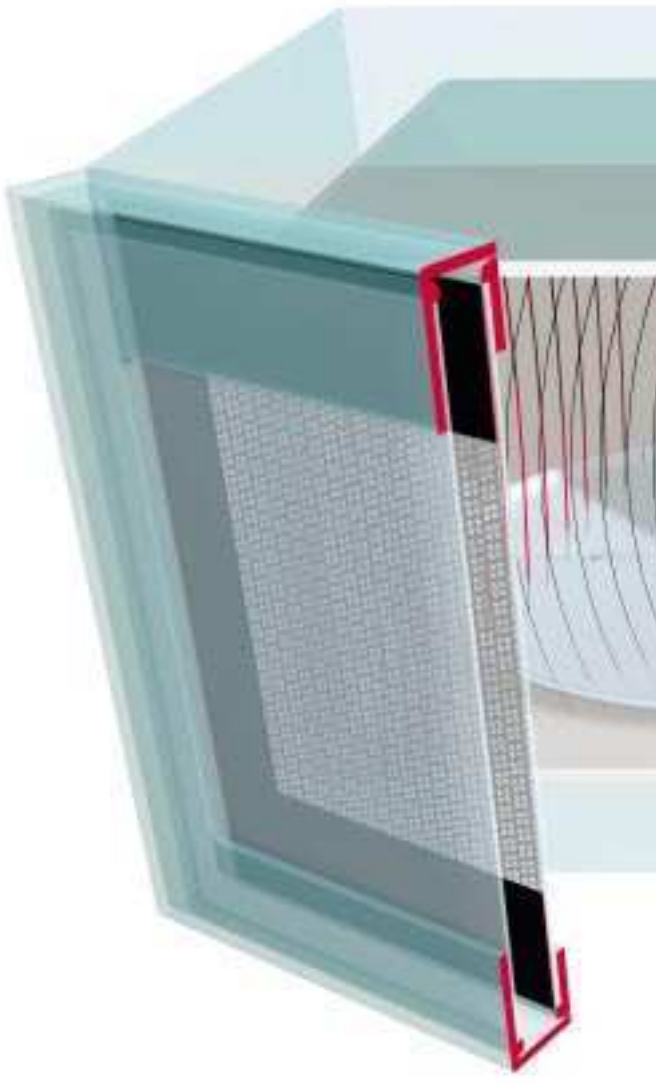
Heute stehen Mikrowellenherde in mehr als sechzig Prozent der deutschen Küchen, denn das Verfahren erwärmt insbesondere wasser- und fetthaltige Nahrungsmittel deutlich schneller als etwa der klassische Kochtopf. Der überträgt durch Wärmeleitung Energie von der elektrisch beheizten Kochplatte auf eine Speise, ein Grill erwärmt durch infrarote Strahlung, ein Umluftherd mittels heißer Luft. In allen drei Fällen erreicht die Energie zunächst die Oberfläche des Garguts und gelangt durch Wärmeleitung in das Innere. Das verhindert ein schnelles Erhitzen.

Anders im Mikrowellenherd: Die elektromagnetischen Wechselfelder dringen in das Lebensmittel ein und werden erst im Innern absorbiert und in Wärme umgesetzt. Während es nichts hilft, die Temperatur eines Backofens zu erhöhen, um einen Braten schneller auf den Tisch zu bringen – er wird lediglich außen verkohlen –, lässt sich per Mikrowelle eine höhere Leistungen in das Gargut bringen und das Essen so schneller zubereiten.

Allerdings kommt man auch beim Mikrowellenherd nicht ganz ohne Wärmeleitung aus. Die Eindringtiefe der Wellen ist begrenzt, zum Beispiel verlieren sie in Fleisch je nach Salz- und Wassergehalt ein Drittel ihrer Energie auf den ersten 2,5 Zentimetern. Die auf dieser Strecke erzeugte Wärme wird dann auf Grund der Temperaturdifferenz nach innen weitergeleitet. Hersteller von Fertigmahlzeiten achten auch darauf, ihr Produkt möglichst homogen zu machen, denn unterschiedliche Bestandteile oder Aggregatzustände werden nicht gleich schnell heiß. So absorbiert flüssiges Wasser Mikrowellen stark, gefrorenes jedoch kaum, denn die Moleküle sind im Eis stärker gebunden. Zum Auftauen von Lebensmitteln muss man sich also auch in der Mikrowelle Zeit nehmen. Zudem empfiehlt es sich, das Gargut gelegentlich umzurühren und nach dem Erhitzen noch ein wenig Zeit zu geben, in der sich die Wärme gleichmäßiger in der Speise verteilen kann.

Bei der Konstruktion der Öfen wie bei der Gestaltung speziellen Mikrowellengeschirrs versuchen die Entwickler auch Reflexionen an Grenzflächen zu vermeiden, denn bei Überlagerung können sich die Wellen gegenseitig verstärken oder abschwächen, sodass heiße oder kalte Stellen im Gargut die Folge wären. ◁





Bernhard Gerl ist Physiker und arbeitet als Fachautor in Regensburg.

Im **Magnetron** ist eine zylinderförmige Kathode von einer ringförmigen Anode umgeben, in die in gleichmäßigen Winkelabständen breite Schlitze gefräst sind. Dadurch entstehen miteinander gekoppelte »Hohlraumresonatoren«. Zwischen Kathode und Anode liegt eine Gleichspannung von zirka 4000 Volt und damit ein starkes elektrisches Feld. Zwei Permanentmagnete erzeugen senkrecht dazu ein magnetisches. Durch die Wirkung beider Felder und durch die Geometrie der Anordnung werden Elektronen, die aus der Kathode austreten, in Paketen auf eine Kreisbahn geschickt. Sie induzieren dabei in den Hohlraumresonatoren eine elektrische Schwingung mit der Frequenz 2,45 Gigahertz.

WUSSTEN SIE SCHON?

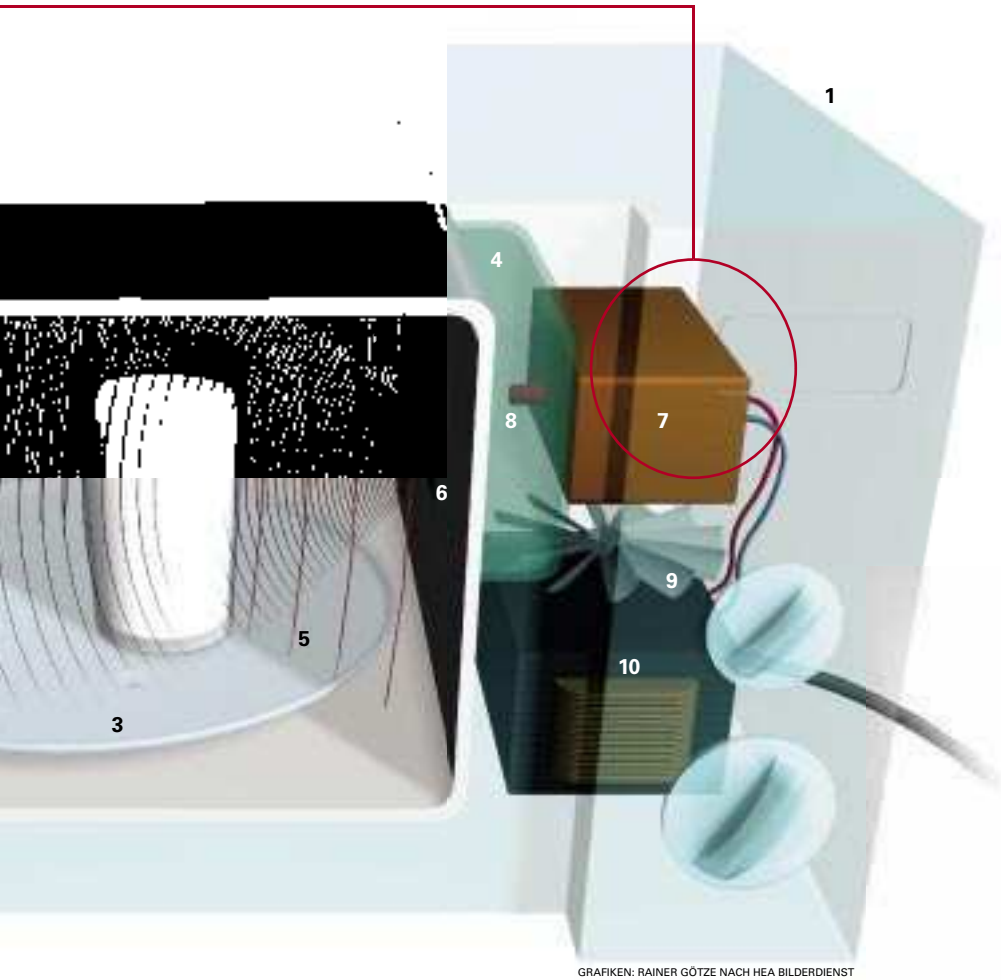
Der erste Mikrowellenherd wurde 1954 verkauft. Er wog 750 Kilogramm, hatte eine Leistung von 1600 Watt und war so groß wie eine Gefriertruhe.

Die Idee, Mikrowellen zum Kochen zu verwenden, stammt von Percy LeBaron Spencer von der Firma Raytheon. Er bemerkte, dass Radarstrahlen einen Schokoladenriegel in seiner Jackentasche geschmolzen hatten.

Anders als ultraviolette oder Röntgenstrahlung wirken Mikrowellen nicht ionisierend, sie können aber einen ungeschützten Körperteil schnell erwärmen. Metallgehäuse und feine Drähte, eine Lochblende oder ein Gitter in der Glastür schirmen Mikrowellen deshalb nach außen ab. Im Betrieb darf die Leckstrahlung in fünf Zentimetern Entfernung nicht stärker sein als die Wärmestrahlung, die von einem menschlichen Körper ausgeht, nämlich 5 mW/cm^2.

Metallenes Geschirr oder solches mit elektrisch leitenden Dekorationen wie Goldrändern haben im Miktrowellenofen nichts verloren, denn in der Oberfläche von Metallen entstehen Wirbelströme hoher Stromdichte. Das Metall schmilzt, verdampft und spritzt als Funken im elektrischen Feld zwischen Metallgegenstand und Wand davon.

Da die Luft im Mikrowellenherd kalt ist, geben die äußeren Schichten der Lebensmittel Wärme ab, sind also innen heißer als außen. Deshalb kann sich keine braune Kruste bilden wie beispielsweise beim Braten in der Pfanne. Ist diese aber gewünscht, kann spezielles Geschirr abhelfen, das sich selbst im Strahlenfeld aufheizt.



GRAFIKEN: RAINER GÖTZE NACH HEA BILDERDIENST

Das **Gehäuse (1)** reflektiert die Mikrowellenstrahlung, schützt so die Umgebung und verteilt die Strahlung gleichmäßig im Garraum. Die **Maße des Garraums (2)** sind auf eine Wellenlänge von 12,25 cm abgestimmt. Er wirkt deshalb wie ein Hohlraumresonator. Von den Wänden reflektierte Wellen verstärken jeweils die ankommenden. Interferenzen können besonders heiße Bereiche verursachen. Deshalb dreht ein Elektromotor das Gargut auf einem **Drehteller (3)** im Strahlungsfeld. Alternativ dazu erzeugen sich drehende, reflektierende Rotoren oder Antennen ein kreisendes Feld. Der **Hohlleiter (4)** leitet die **Mikrowellen (5)** vom Magnetron über die **seitliche Einkoppelung (6)** in den Garraum. Im **Magnetron (7)** wird eine Schwingung von 2,45 GHz erzeugt. Diese wird über den **Koppelstift (8)** in den Hohlleiter geleitet. Bei der Erzeugung von Strahlung im Magnetron entstehen zirka 25 Prozent Verlustwärme. Diese muss über ein **Kühlgebläse (9)** abgeführt werden. Der **Transformator (10)** erzeugt die erforderliche hohe Versorgungsspannung aus den 220 Volt Netzspannung.

3-D-Einblicke in die Zellmaschinerie

Ein raffiniertes tomografisches Verfahren mit hoher räumlicher Auflösung führt buchstäblich vor Augen, welch ein Gedränge in Zellen herrscht und wie viel Wert Moleküle auf Teamarbeit legen.

Von Wolfgang Baumeister und Olaf Fritsche

Natürlich und lebensnah – so wünschen sich Biologen Bilder von Zellen und Molekülen. Doch die sind winzig klein und ständig in Bewegung. Um die Strukturen des Lebens überhaupt sichtbar machen zu können, unterziehen Wissenschaftler die Objekte meistens einer harschen Prozedur, bei der die Zellen einen langsamen Tod sterben und ihre empfindlichen Feinstrukturen zerstört werden. Das Ergebnis sind zweidimensionale Momentaufnahmen, die oft wenig mit dem natürlichen Zustand gemeinsam haben. Oder die Forscher achten mehr auf Details: Sie brechen die Zellen auf und isolieren die stabilsten Molekülkomplexe in mehreren Arbeitsschritten aus den Bruchstücken, um mit aufwendigen Verfahren exakte Modelle dieser vereinzelten Strukturen zu erhalten. Daraus ein räumliches Bild von einer intakten und zudem aktiven Zelle zu machen, bleibt schließlich ihrer Vorstellungskraft überlassen.

Mit einer neu entwickelten Technik, die dreidimensionale Abbilder ganzer Zellen erstellt, verschaffen sich Biologen nun auch direkte Einblicke in deren Aufbau. Ähnlich wie die bekannten tomografischen Verfahren aus der medizinischen Diagnostik verbindet diese Elektronentomografie im Computer Bildserien zu räumlichen Modellen. Auch wenn die Methode noch sehr jung ist, tragen die bis heute vorliegenden Studien bereits zu einem Umdenken in der Zellbiologie bei. Denn die hohe räumliche Auflösung führt buchstäblich vor Augen, welch ein Gedränge in Zellen herrscht und wie viel Wert Moleküle auf Teamarbeit legen.

GLOSSAR

- Bei der **Kryofixierung** werden biologische Proben in Bruchteilen von Sekunden auf die Temperatur von flüssigem Stickstoff (–196 °C) abgekühlt. Die Strukturen bleiben in ihrem natürlichen Zustand und sind häufig noch lebensfähig.
- **Elektronentomografie** ist ein Verfahren, mit dem zweidimensionale elektronenmikroskopische Aufnahmen von Zellen oder Zellteilen zu einem hoch aufgelösten dreidimensionalen Modell kombiniert werden.
- Die **Kryo-Elektronentomografie** ist eine neue Methode, die durch eine Kombination der beiden genannten Methoden räumliche Abbilder lebensnaher Objekte erzeugt.

Eigentlich ist die Idee, aus einem Satz zweidimensionaler Bilder einer Zelle ein dreidimensionales Modell zu erstellen, nicht gerade neu. Seit Mitte der 1950er Jahre konnten Wissenschaftler mit so genannten Ultramikrotomen ihre Präparate in hauchdünne Scheibchen schneiden, die für das Elektronenmikroskop geeignet waren. Dafür wurden die Zellen als Erstes chemisch fixiert, anschließend mit organischen Lösungsmitteln entwässert und in Kunststoff gebettet, um sie fest genug für den Schneidvorgang zu machen. Schweratome sollten sich als Kontrastmittel an die feinen Strukturen anlagern und sie dadurch im Bild hervorheben. Weil jedoch nicht genau bekannt war, welche Wechselwirkungen dabei auftraten, wusste man auch nicht sicher, ob die Schweratome in die Strukturen eindrangen oder nur an deren Rändern lagen.

Die Scheibchen wurden schließlich einzeln mit dem Elektronenmikroskop abgebildet und vom Bildschirm abfotografiert, in späterer Zeit manchmal im Computer miteinander kombiniert. In der jeweiligen Schnittebene waren so noch Objekte zu erkennen, die nicht mehr als vier Nanometer (vier millionstel Millimeter) groß waren. Senkrecht dazu lag die Auflösung jedoch nur bei fünfzig Nanometern, der Dicke eines Schnitts. Das war immerhin ausreichend, um den Feinbau von Zellen zu entschlüsseln. Einen Großteil des heutigen Wissens über

A. S. FRANGAKIS ET AL., PNAS 99 (2002), 14153

Erst Computer ermöglichen die Kryo-Elektronentomografie von Zellen. Das System wird an Phantomzellen trainiert, membranumhüllten Hohlkügelchen, angefüllt mit bestimmten Testproteinen. Abgebildet ist ein Schnitt durch zwei rekonstruierte Phantomzellen. Die darin enthaltenen Proteinmoleküle (blau und gelb) hat ein spezielles Computerprogramm anhand atomgenauer Vorlagen automatisch identifiziert und lokalisiert.

Zellstrukturen haben Biologen auf diese Weise gewonnen. Will man jedoch das Verhalten der wahren Akteure des Lebens, der Moleküle, verstehen, braucht man eine erheblich bessere Auflösung, und zwar in alle drei Raumrichtungen.

Im Jahre 1968 veröffentlichten drei Arbeitsgruppen unabhängig voneinander Artikel, in denen sie ein anderes Prinzip beschrieben, das ohne Schnitte auskommt. Wie bei einer traditionellen medizinischen Röntgenaufnahme von einem Patienten entsteht bei konventioneller Elektronenmikroskopie ein zweidimensionales Abbild des inneren Aufbaus einer Zelle. Für eine räumliche Darstellung musste man Bilder, die aus verschiedenen Projektionsrichtungen aufgenommen wurden, im Computer miteinander kombinieren (siehe Kasten Seite 46).

Zellen im Kälteschlaf

Praktisch ist es dafür allerdings nötig, das zu mikroskopierende Objekt im Strahl zu drehen und aus möglichst vielen Blickwinkeln Aufnahmen zu machen. Das Präparat ist also sehr lange der Elektronenstrahlung ausgesetzt und zerfällt darin regelrecht; etwa die Hälfte der Masse eines in Kunststoff gebetteten Objekts kann so verloren gehen. An eine naturgetreue Abbildung von Zellen und ihren Bestandteilen war unter diesen Bedingungen natürlich nicht zu denken. Und so fiel die Methode der Elektronentomografie bis auf wenige Pionierstudien erst einmal für mehrere Jahrzehnte in einen Dornröschenschlaf.

Vor allem zwei Arbeitsgruppen haben die Idee weiter verfolgt – eine in USA, eine in Deutschland. Mit computergesteuerten Elektronenmikroskopen zur Positionierung der Probe und mit empfindlichen digitalen Kameras gelang es ihnen im Verlaufe der 1990er Jahre, einen Großteil der technischen Schwierigkeiten zu lösen. Während das Team an der Universität von Kalifornien in San Francisco sich hauptsächlich auf relativ dicke Objekte konzentriert, die in Kunststoff eingebettet werden, steht am Max-Planck-Institut für Biochemie in Martinsried die Forschung an schockgefrorenen Zellen und an den darin befindlichen Molekülkomplexen im Vordergrund.

Dafür werden die Proben innerhalb von Sekundenbruchteilen auf die Temperatur von flüssigem Stickstoff (–196 °C) abgekühlt. Den Wassermolekülen bleibt dabei keine Zeit, das typische Kristallgitter von Eis einzunehmen, sie verharren stattdessen in einem amorphen Zustand. Diese als Kryofixierung bezeichnete Technik friert die Zelle buchstäblich schlagartig ein, ohne die empfindlichen Strukturen in ihrem Inneren zu beschädigen. Würde man die ganzen Zellen wieder auftauen, wären viele von ihnen weiterhin lebensfähig. Die Temperatur wird jedoch während der gesamten Untersuchung – also auch bei der Betrachtung im Elektronenmikroskop – mit flüssigem Stickstoff niedrig gehalten. Im Gegensatz zu der klassischen Einbettung in Kunststoff sind die Zellen bei der Kryofixierung somit lebendig oder zumindest in einem sehr lebensnahen Zustand.

Die schockgefrorene Probe kommt in ein Elektronenmikroskop, das für Aufnahmen bei Tiefsttemperaturen ausgelegt ist. Da das Objekt aus mehreren Winkeln aufgenommen werden soll, muss es möglich sein, den Probenhalter im Mikroskop zu kippen. In Größenbereichen von tausendstel Millimetern stellt dies hohe Anforderungen an die Präzision der Mecha- ▷

Das Prinzip der Elektronentomografie

Der Kathodenstrahl des Elektronenmikroskops durchleuchtet das Objekt (rot) aus verschiedenen Richtungen von vorn und der Seite. In Wirklichkeit wird das Objekt, nicht der Strahl gedreht. Je nach der Form des Moleküls oder der Zellstruktur ergeben sich verschiedene Projektionen (Halbkreisbildchen links), aus denen der Computer die räumliche Struktur berechnet (zentrales Bild rechts).

W. BAUMEISTER ET AL., TRENDS IN CELL BIOL. 9 (1999), 81

▷ nik, damit das Objekt nicht zu sehr aus dem Fokus des Elektronenstrahls oder gar aus dem Blickfeld gerät. Die Martinsrieder Wissenschaftler haben für diese Aufgabe eine automatisierte Prozedur entwickelt, die schneller und zuverlässiger ist als manuelle Korrekturen (siehe Kasten Seite 48). So konnten sie die Strahlenbelastung der Probe während des Neujustierens auf ein Minimum herabsenken, und nur Elektronen, die zur Bilderzeugung genutzt werden, belasten das Objekt.

Für ein räumliches Modell von guter Qualität muss das Präparat schrittweise über einem möglichst großen Winkelbereich mit kleinen Drehungen von ein bis zwei Grad zwischen den Einzelbildern aufgenommen werden. Dem steht jedoch das Risiko entgegen, dass die Elektronen die empfindlichen Strukturen beschädigen und im schlimmsten Fall eine Rekonstruktion des Objekts im Computer unmöglich machen. Die Forscher müssen daher mit einem Kompromiss zwischen den beiden widersprüchlichen Anforderungen arbeiten. Sie regeln den Elektronenstrahl so, dass die Gesamtdosis bei allen Aufnahmen zusammen unter einem kritischen Schwellenwert bleibt. Jede einzelne Projektion ist deshalb extrem »unterbelichtet« und enthält gerade so viele Informationen, dass sie mit den benachbarten Ansichten zur Deckung gebracht werden kann.

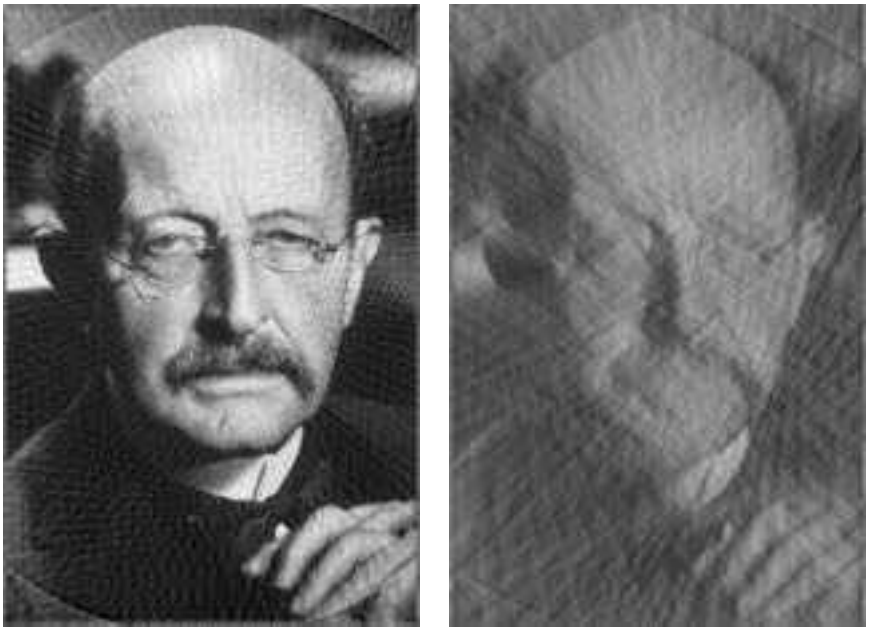
Die rekonstruierte Zelle kann der Wissenschaftler dann am Computer nach Belieben in Schichten zerlegen und Strukturen im Inneren erkennen, ohne die echte Zelle jemals zerschnitten zu haben. Insgesamt reicht die Auflösung aus, um viele große Moleküle schon anhand ihrer Form zu identifizieren (Bild rechts). Eine solche Rekonstruktion zeigt Strukturen, die mit keiner anderen Methode sichtbar gemacht werden könnten.

Allerdings nimmt auch die Qualität der Tomogramme mit steigender Objektdicke ab. Fallen die Elektronen beispielsweise nicht direkt von oben nach unten durch die Probe, sondern schräg in einem siebzig Grad flacheren Winkel müssen sie schon aus geometrischen Gründen fast die dreifache Strecke durch Material zurücklegen. Bei kleineren biologischen Objekten macht das nicht viel aus.

Viren, Bakterien und die als Organellen bezeichneten Körperchen aus Zellen höherer Organismen können als Ganzes aufgenommen werden; dabei werden derzeit Auflösungen von etwa vier Nanometern erreicht. Strukturen, die dicker als ein tausendstel Millimeter sind, müssen jedoch vor der Tomografie bei tiefen Temperaturen in Scheiben geschnitten werden. Dies ist vor allem bei Zellen höherer Organismen und bei Zellverbänden der Fall.

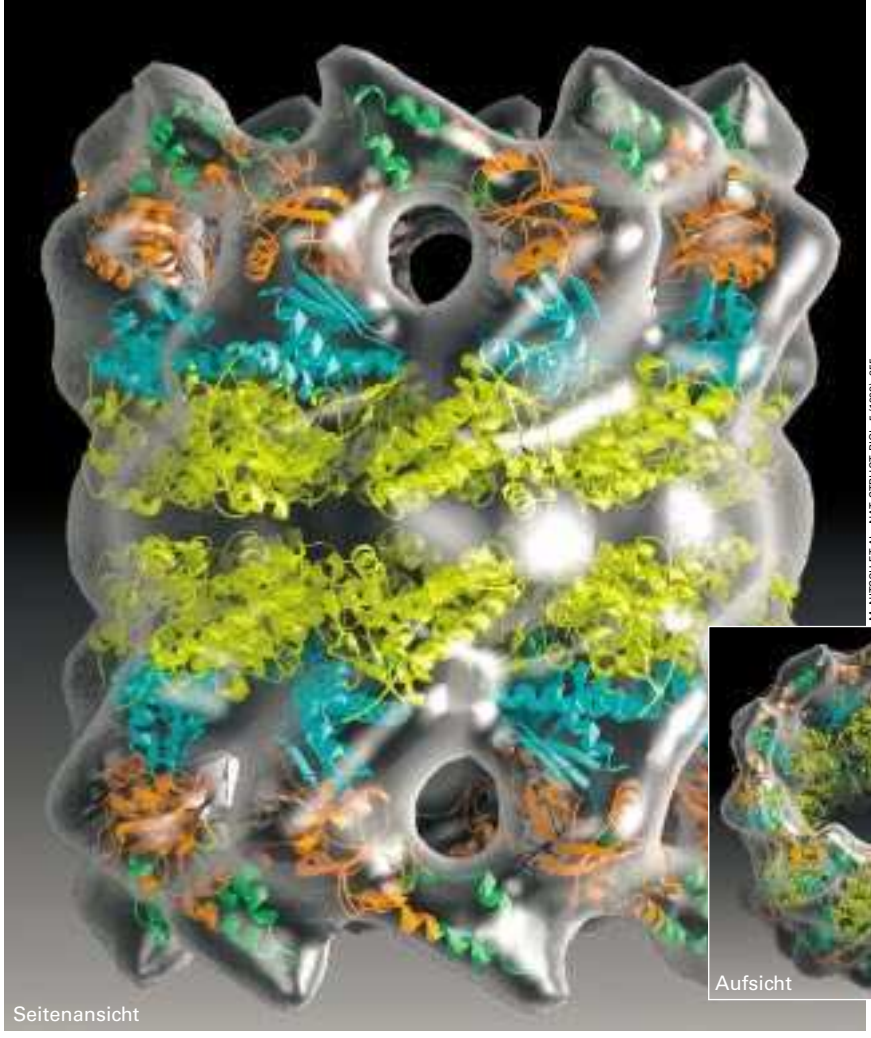
Computerschulung an Phantomzellen

In Zukunft soll die Grenze des Erkennbaren weiter verschoben werden bis hin zu zwei Nanometern. Dann ließen sich auch molekulare Vorgänge, die in jenen Größenordnungen ablaufen, studieren. Die Elektronentomografie schließt somit die Lücke zwischen der Lichtmikroskopie, deren Objekte ganze Zellen oder übergeordnete Strukturen sind, und den hochauflösenden Techniken wie Röntgenstrukturanalyse, mit denen Wissenschaftler den atomaren Aufbau einzelner Moleküle ermitteln (Kasten rechts). Lichtmikroskopische Bilder liefern zwar einen guten Überblick von lebenden Zellen, zeigen aber keine molekularen De-



ARCHIV ZUR GESCHICHTE DER MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

Überdecken die einzelnen Beobachtungswinkel bei dem oben beschriebenen Verfahren 180 Grad, ist das rekonstruierte Abbild nahezu perfekt (links). Je eingeschränkter aber der Winkelbereich, umso schlechter die Bildqualität (rechts). Der Effekt ist der Anschaulichkeit halber am Porträt von Max Planck übertrieben dargestellt.



M. NITSCH ET AL., NAT. STRUCT. BIOL. 5 (1998), 855

Keine moderne Plastik, sondern ein Thermosom aus Hitze liebenden Archaebakterien: Dieses hohle Protein setzt sich aus mehreren Untereinheiten zusammen und hilft anderen Eiweißmolekülen, sich korrekt zu falten. Wie exakt die Kryo-Elektronentomografie die räumliche Form eines Proteins (grau) ermittelt, zeigt sich beim Vergleich mit der atomaren Struktur (farbige Bänder).

tails. Daran mangelt es bei Molekülmodellen keinesfalls, doch wo die Stoffe in der Zelle vorkommen, wie sie interagieren und welche Funktion sie dort auf welche Weise ausüben, ist nicht ersichtlich. Biochemische Versuche, bei denen verschiedene Moleküle im Reagenzglas miteinander reagieren, geben keine endgültige Antwort, ob diese Abläufe auch in der Zelle wirklich so vor sich gehen. Zudem überstehen nur relativ fest verbundene Komplexe die einzelnen Isolierungsschritte, und seltene oder nur kurzzeitig zusammengelagerte Molekülgruppen werden dabei leicht ganz übersehen.

Da die Zellen oder ihre Scheibchen bei der Datenaufnahme in einem lebensnahen Zustand sind, könnte die Elektronentomografie mit Bildern, die buchstäblich aus dem Leben gegriffen sind, eine Verbindung von Detail und Übersicht liefern. Dazu ist es jedoch notwendig herauszufinden, welche Zellstrukturen und Moleküle sich hinter den grauen Schattierungen und Körnungen in der rekonstruierten Zelle verbergen.

Die Aufgabe gleicht der berühmten Suche nach der Nadel im Heuhaufen, weshalb die Wissenschaftler in Martinsried sie vom Computer erledigen lassen. Die ersten Versuche führten sie nicht an echten Zellen durch, sondern an so genannten Phantomzellen – künstlichen membranumgebenen Hohlkügelchen, die sie mit wenigen, genau bekannten Proteinen gefüllt hatten. Damit die Aufgabe nicht zu einfach für den Computer wurde, handelte es sich allerdings um verschiedene Proteinarten mit sehr ähnlicher Gestalt.

Quasi als Steckbrief der gesuchten Objekte dienten genaue Strukturdaten, wie sie beispielsweise mit Röntgenanalysen an Kristallen des jeweiligen Proteins gewonnen und heutzutage in großer Zahl aus elektronischen Datenbanken abgefragt werden können. Anhand dieser räumlichen Vorlagen durchsuchen spezielle Programme dann die tomografische Rekonstruktion. Erschwert wird ihre Arbeit dadurch, dass die Proteine um jede beliebige Achse gedreht sein können. Bei echten Zellen kommt noch hinzu, dass viele Proteine in verschiedenen Zuständen auftreten, in denen sie unterschiedlich geformt sind. Von manchen dieser Varianten liegen keine hinreichend genauen Strukturdaten vor, sodass die Programme sich in solchen Fällen nur nach ungefähren Vorlagen richten können.

Selbst unter den vereinfachten Bedingungen der Phantomzellen müssen sie so viele mögliche Blickwinkel und Orientie- ▷

Von Zellen zu Atomen

Die Elektronentomografie überbrückt die Lücke zwischen der Lichtmikroskopie und der atomaren Strukturanalyse. Die Abbildungen zeigen links die soziale Amöbe *Dictyostelium discoideum* in einer Fluoreszenzaufnahme, in der Mitte ein Proteasom – eine Art Reißwolf für Proteine – in einer räumlichen Auflösung, wie die Elektronentomografie sie gegenwärtig erreicht, schließlich rechts ein Proteasom in atomarer Auflösung, ermittelt durch Röntgenstrukturanalyse.

	Lichtmikroskopie	Elektronentomografie	Röntgenstrukturanalyse oder Kernspinresonanz (NMR)
Auflösungsvermögen	bis 0,0005 Millimeter	bis 0,000002 Millimeter	bis 0,0000001 Millimeter
Objekte	Zellen und größere Zellstrukturen	große Moleküle	atomare Strukur von Molekülen

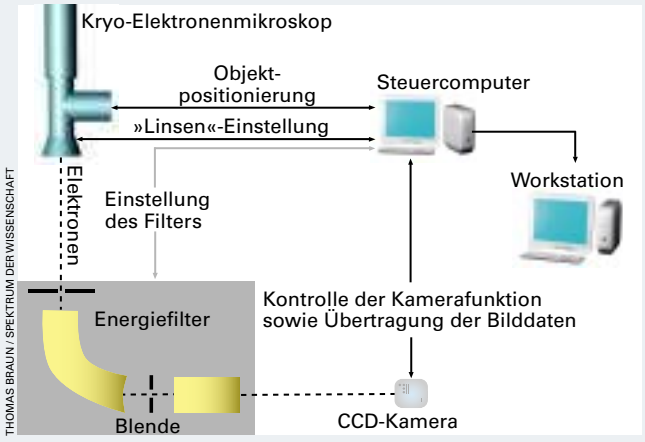
Kryo-Elektronentomografie

Mit viel Technik zum Ziel

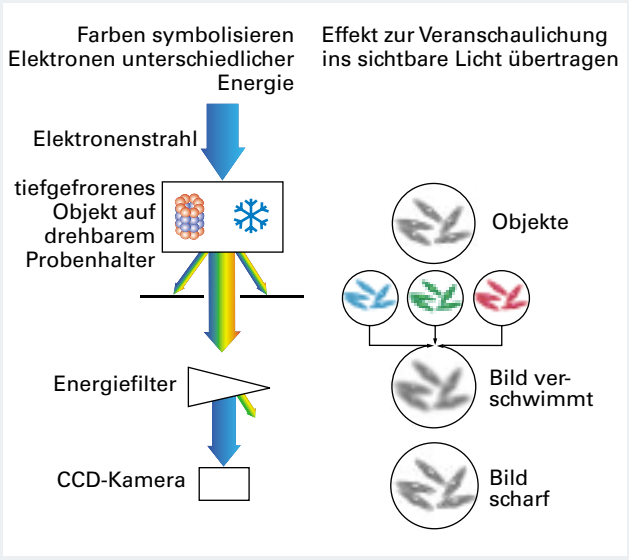
Für den Schritt vom zweidimensionalen Bild zum dreidimensionalen Tomogramm ist ein Transmissions-Elektronenmikroskop notwendig, das vollautomatisch per Computer gesteuert werden kann. Außerdem muss es für Arbeiten bei Tiefsttemperaturen ausgelegt sein und über einen drehbaren Probenhalter verfügen.

Sobald sich das Objekt mit der gewünschten Stelle im Fokus des Elektronenstrahls befindet, übernimmt der Rechner die Kontrolle (unten). Er kippt den Probenhalter zwischen den einzelnen Aufnahmen um einen genau festgelegten Winkel und korrigiert Verschiebungen, die durch mechanische Ungenauigkeiten entstehen. Bei allen Voreinstellungen lenkt er den Elektronenstrahl nicht durch den eigentlich zu untersuchenden Bereich, sondern durch benachbarte Regionen. Auf diese Weise wird die Strahlenbelastung des Objekts so niedrig gehalten, dass sie über die gesamte Messung gesehen unter einem kritischen Schwellenwert bleibt.

Die Aufgabe des Detektors übernimmt eine gekühlte CCD-Kamera *(Charge Coupled Device)*. In ihr treffen die Elektronen zunächst auf einen Leuchtschirm, und die entstehenden Photonen gelangen über Lichtleiter zum CCD-Chip, wo sie wieder in ein elektrisches Signal umgewandelt werden. Außerdem wird das Bild auf dem Chip in einzelne Bildpunkte gerastert.



Schema des Versuchsaufbaus



Prinzip der Energiefilter

Als digitalisiertes Datenpaket gelangen die Aufnahmen in einen lokalen PC (Steuercomputer) und zur weiteren Verarbeitung in einen Computer mit Parallelarchitektur (Workstation). Spezielle Programme rekonstruieren aus den einzelnen Projektionen schließlich ein dreidimensionales Tomogramm, das den Zustand des ganzen Objekts mit allen auflösbaren Details erkennen lässt.

Bei Objekten, die dicker sind als etwa 200 millionstel Millimeter, stoßen die Elektronen des Elektronenstrahls öfter mit den Atomen der Probe zusammen. Ein Teil der Elektronen ändert nur seine Richtung, andere verlieren dabei Energie. Im sichtbaren Bereich des Lichts hieße das: Die Wellenlänge verschiebt sich von beispielsweise blau nach rot (Bild oben). Diese energieärmeren Elektronen verschmieren das Bild und machen es unscharf. Als Gegenmaßnahme haben die Wissenschaftler am Max-Planck-Institut in Martinsried einen Energiefilter hinter die Probe geschaltet. Darin zwingt ein starkes Magnetfeld die Elektronen in eine Kurve (links), sodass nur Elektronen mit der ursprünglichen Energie auf den Detektor treffen. Das Resultat ist ein schärferes Bild mit starken Kontrasten.

▷ rungen der Moleküle berücksichtigen, dass ein einzelner Mikroprozessor schon zur schrittweisen Überprüfung eines winzigen Teilvolumens des Tomogramms mehrere Tage benötigen würde. Deshalb wählen die Programme in einem ersten groben Vorlauf jene Regionen aus, die überhaupt Teilchen passender Größe enthalten, und führen darin anschließend eine genauere Kontrolle durch. Dabei werden die einzelnen viel versprechenden Regionen auf mehrere Prozessoren aufgeteilt und parallel überprüft, wodurch die Rechenzeit bis zur fertigen Verteilungskarte der Proteine auf einige Stunden herabsinkt (siehe Bild Seite 45). Im Prinzip ließe sich auf diese Weise die Gesamtheit aller Proteine einer Zelle, das so genannte Proteom, in einem lebensnahen Schnappschuss bei der Arbeit beobachten.

Ist ein Tomogramm einmal erstellt, können Wissenschaftler es, wenn später passende Strukturdaten für irgendein beliebiges Molekül hinzukommen, erneut durchsuchen. Zusätzliche Markierungen mit Goldkörnchen, die im Elektronenmikroskop mit hohem Kontrast erscheinen, dienen nur als Orientierungspunkte für den Computer, damit er die vielen Einzelbilder korrekt miteinander kombinieren kann. Denn die Metallkügelchen kommen nicht in die Zellen, sondern nur auf den Objektträger und in das Eis. Die Proteine und makromolekularen Komplexe selbst erkennt der Computer ohne jede Markierung an ihren Formen.

Auch die Wechselwirkungen verschiedener Moleküle untereinander sind ein interessantes Anwendungsfeld für die Elektronentomografie. Viele dieser Kontakte sind nur schwach oder von kurzer Dauer. Bei einer biochemischen Präpara-

tion zerfallen solche Komplexe leicht, für ein Tomogramm werden sie hingegen blitzschnell durch Einfrieren fixiert. Sogar ganze Reaktionsketten ließen sich mit all ihren Teilschritten entschlüsseln. Denn da wirklich jedes einzelne Teilchen in seinem aktuellen Zustand zum Zeitpunkt der Fixierung eingefroren ist, wäre es möglich, individuelle Unterschiede von Molekülen einer Sorte zu untersuchen. Ein und dasselbe Tomogramm kann so immer wieder nach unterschiedlichen Fragestellungen analysiert werden.

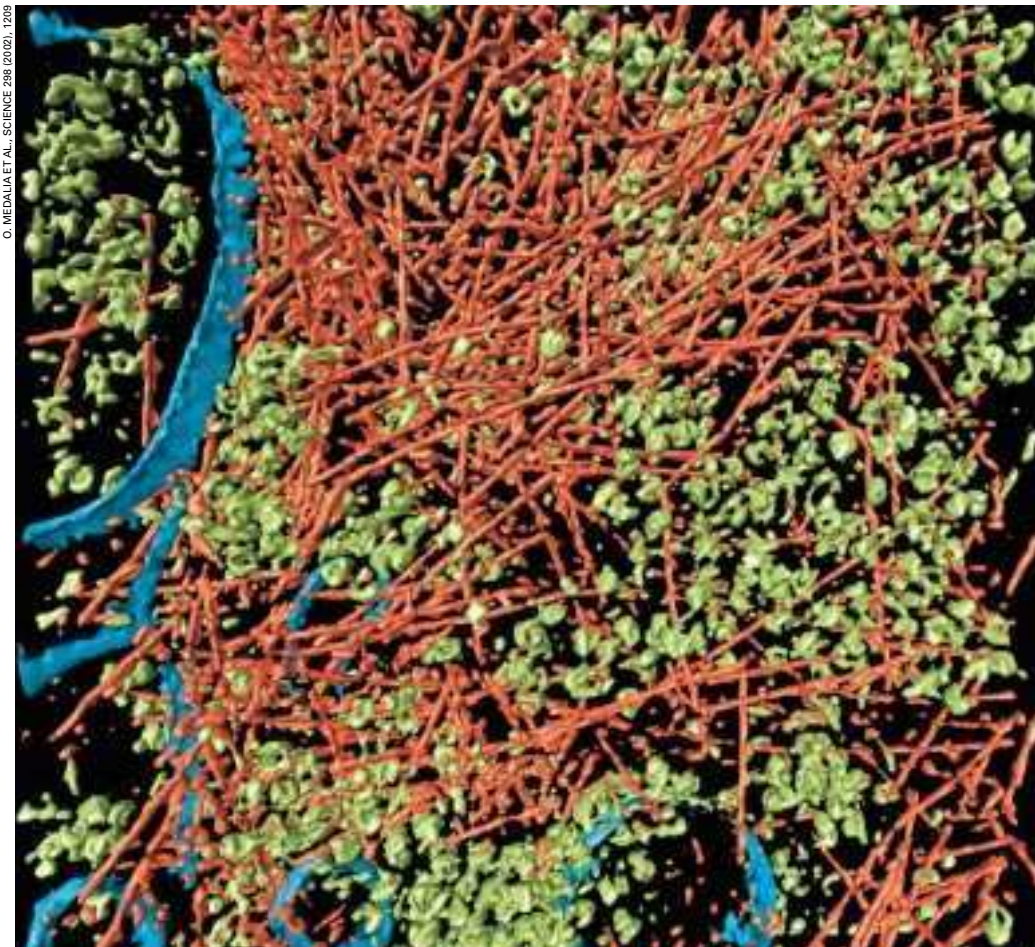
Wie Luftbildaufnahmen einer geschäftigen Baustelle

Zur Demonstration der Möglichkeiten haben die Wissenschaftler am Max-Planck-Institut den Aufbau des Zellskeletts und seine Verbindungen zur Zellmembran am Beispiel der überaus beweglichen sozialen Amöbe *Dictyostelium discoideum* untersucht. Viele Proteine dieses Einzellers, auch die seines »Innengerüsts«, ähneln übrigens Eiweiß-Sorten in menschlichen Zellen. Sein Zellskelett besteht aus einem Netzwerk von Aktin-Molekülen, das beim Kriechen auf einer Oberfläche, bei der Nahrungsaufnahme und bei der Zellteilung innerhalb von Sekunden umgebaut wird. Eine ganze Reihe verschiedener Proteine ist an dieser Aktion beteiligt, während andere mithelfen, die unbeteiligten Abschnitte des Zellskeletts stabil zu halten.

Die Tomogramme der Amöben zeigen an den Zellrändern dicht gepackte Ansammlungen von Aktin-Fäden und Ribosomen, den Proteinfabriken der Zellen (Bild rechts). Dies deutet auf einen regen Umsatz von Proteinen hin: Ständig werden Aktin-Bausteine entfernt oder hinzugefügt und müssen in den Ribosomen nachproduziert werden. In manchen Regionen kreuzen sich die Aktin-Stränge oft, in anderen liegen sie eher parallel zueinander, wobei spezielle Verbindungsproteine die Kontakte zwischen ihnen herstellen. Auch dort, wo das Zellskelett auf die Membran trifft, scheinen bestimmte Proteine die beiden Strukturen miteinander zu verknüpfen. Häufig ist im Tomogramm an diesen Stellen ein Knick im Aktin-Strang zu sehen. Wie eine Luftbildaufnahme von einer geschäftigen Baustelle liefert das rekonstruierte Zellmodell einen Überblick von dem Geschehen. In Kombination mit dem Wissen aus biochemischen und genetischen Untersuchungen lassen sich dessen einzelne Akteure identifizieren und lokalisieren.

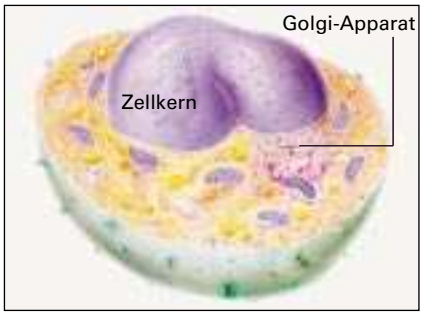
Die Studie des Zellskeletts repräsentiert lediglich ein erstes Beispiel für die heutigen Möglichkeiten der Elektronentomografie. Doch schon ein kurzer Blick auf die Bilder macht klar, dass in der Zellbiologie ein Umdenken vonnöten ist: Hatten lange Zeit Zellen als weitgehend leere Räume gegolten, durch die Moleküle relativ ungehindert zu diffundieren vermögen, kann nun jeder leicht sehen, welches Gedränge in Wirklichkeit herrscht. Trotz eines Wasseranteils in Zellen von rund siebzig Prozent füllen Proteine und andere große Moleküle das Innere weitgehend aus. Theoretischen Berechnungen zufolge beträgt der Abstand eines durchschnittlichen Proteins zu seinen Nachbarn nicht mehr als ein Viertel seines eigenen Radius. Tomogramme, in denen mehrere Zellstrukturen und Molekülkomplexe gleichzeitig farblich hervorgehoben werden, zeigen deutlich, dass Zellen wie moderne Fabriken durchorganisiert sind und dass Proteine, die gemeinsam an einer Aufgabe arbeiten, oft auch räumlich eng benachbart vorliegen (Bild Seite 50). Die Vorstellung von übersichtlichen Anordnungen und weiten Freiräumen, wie sie Lehrbücher oder der Blick durch das Lichtmikroskop suggerieren, gehört damit der Vergangenheit an.

Obwohl Elektronentomogramme die eindrucksvollsten Bilder vom Getümmel in den Zellen liefern, stellt gerade dieses Gedränge die Entwickler der Methode vor gewaltige Schwierigkeiten. Denn je enger die Strukturen aneinander liegen, umso häufiger berühren oder verformen sie sich gegenseitig. Ohne wenigstens einen kleinen Abstand verschmelzen die Komplexe jedoch bis zur Unkenntlichkeit und lassen sich nicht mehr voneinander unterscheiden. Wollen Wissenschaftler dennoch zwischen den verschiedenen Strukturen und Proteinen differenzieren können, brauchen sie Tomogramme mit einer höheren Auflösung. Die ließe sich beispielsweise erreichen, wenn die Präparate widerstandsfähiger gegen den Elektronenstrahl wären. Allerdings müssten die Proben dafür auf ▷



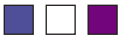
O. MEDALIA ET AL., SCIENCE 298 (2002), 1209

Qualvolle Enge: Dieser Ausschnitt aus dem Tomogramm einer Amöbenzelle zeigt das Zellskelett aus Aktin-Strängen (rot), Teile der stark gewölbten Zellmembran (blau) sowie Ribosomen (grün), die Fabriken für neue Proteine. Selbst bei einer solch begrenzten Auswahl von nur drei verschiedenen Bestandteilen wirkt das Zellinnere übervoll.

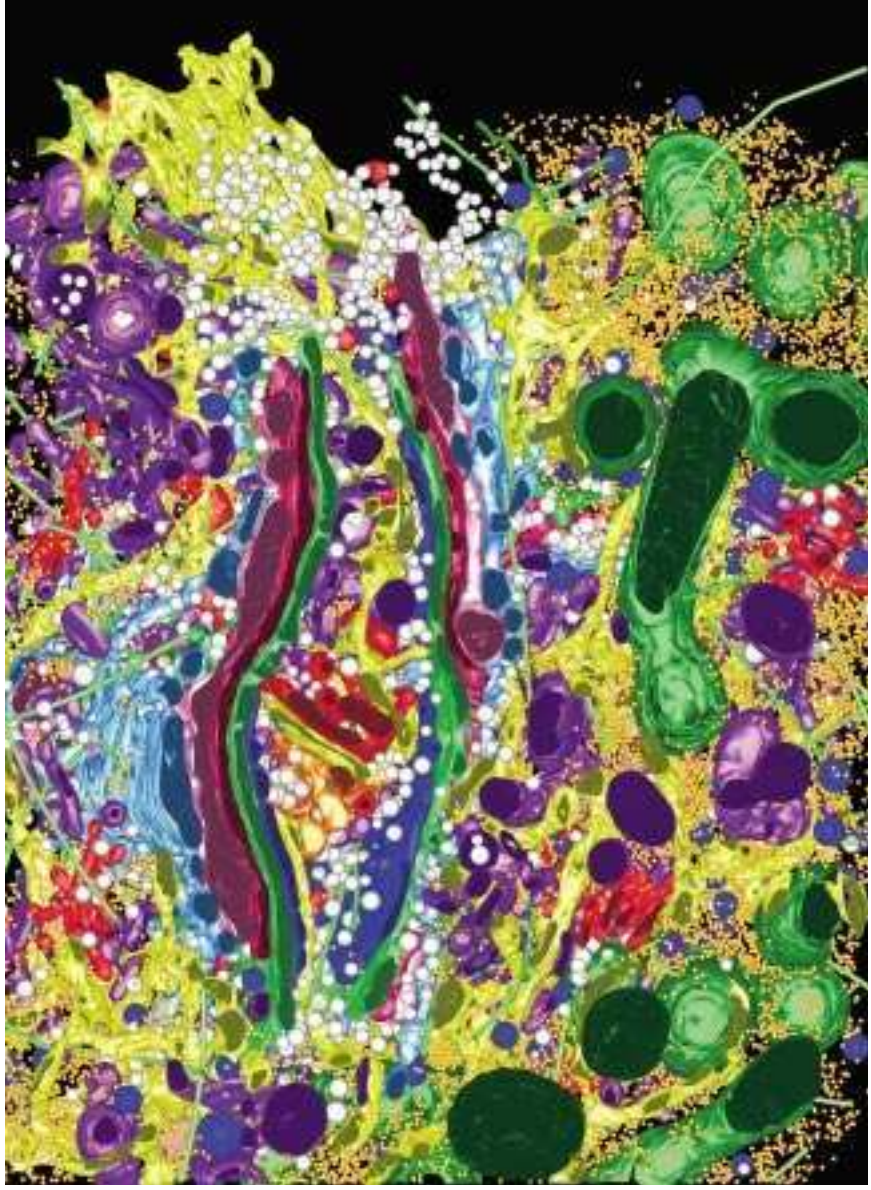


MEDICAL PICTURE

Zisternen des Golgi-Apparats



Vesikel



ARBEITSGRUPPE R. MCINTOSH, UNIVERSITY OF COLORADO IN BOULDER

Im Zellinneren herrscht geschäftiges Gedränge, wie dieser Ausschnitt aus einer hormonproduzierenden Zelle der Bauchspeicheldrüse illustriert. Im Vergleich zu Standardschemata aus Lehrbüchern (kleines Bild) sind Zellen viel komplizierter aufgebaut als lange angenommen. Die Schnittebene rechts führt durch verschiedene Vesikel und Zisternen des so genannten Golgi-Apparats. Die grünen Strukturen rechts außen sind Mitochondrien, die kleinen orangefarbenen Kügelchen Ribosomen.

noch niedrigere Temperaturen abgekühlt werden, um Strahlenschäden zu vermeiden. Als Kühlmittel bietet sich flüssiges Helium an, das kälter als –260 °C ist und in der neuesten Generation von Elektronenmikroskopen verwendet werden kann.

Gute Ergebnisse haben die Martinsrieder Forscher auch mit einem selbst konstruierten Probenhalter gemacht, den sie um zwei statt nur um eine Achse drehen können. Ihren Standardhalter können sie um etwa siebzig Grad nach links und rechts kippen, mehr erlaubt die Geometrie der Technik nicht. Es bleibt ein »toter Winkel«, der mit einem Kippmechanismus um zwei Achsen kleiner ist. Dadurch nimmt das Ausmaß von Verzerrungen in den Tomogrammen ab. Weitere Verbesserungen sind schließlich an den Detektoren der Mikroskope geplant. Bislang treffen die Elektronen hinter der Probe auf einen Szintillationsschirm und erzeugen dort ein Bild, das eine CCD-Kamera über Lichtleiter aufnimmt, digitalisiert und an den Computer weiterleitet (siehe Kasten Seite 48). Mit einer optimierten Anordnung, die weniger anfällig für Störeffekte ist, könnte die Leistungsfähigkeit des Systems möglicherweise verdoppelt werden. Eine Auflösung von zwei Nanometern auch für größere Zellen halten die Martinsrieder in Zukunft für realistisch.

Mit der Entwicklung und Verbreitung der Elektronentomografie gewinnen Biologen neue Einblicke in die Zelle und ihre Lebensvorgänge. Auf anschauliche Weise können sie die detaillierten Erkenntnisse über einzelne Molekülkomplexe in den zellulären Zusammenhang einordnen. Da Tomogramme die Zelle in ihrer Gesamtheit und mit allen Details abbilden, wird in Zukunft die Herausforderung weniger darin bestehen, Daten mit hohem Informationsgehalt zu gewinnen, als vielmehr darin, die relevanten Informationen aus der Fülle zu extrahieren.

Wolfgang Baumeister ist seit 1988 Direktor am Max-Planck-Institut für Biochemie in Martinsried. Seine bereits mehrfach ausgezeichnete Forschungsarbeit hat das Ziel, die von seiner Gruppe entwickelte Kryo-Elektronentomografie auf ganze Zellen anzuwenden und so völlig neue Einblicke in die molekularen Vorgänge des Lebens zu ermöglichen. **Olaf Fritsche** ist promovierter Biophysiker und arbeitet als freier Wissenschaftsjournalist.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Macromolecular Architecture in Eukaryotic Cells Visualized by Cryoelectron Tomography. Von Ohad Medalia et al. in: Science, Bd. 298, S. 1209, 8. November 2002.

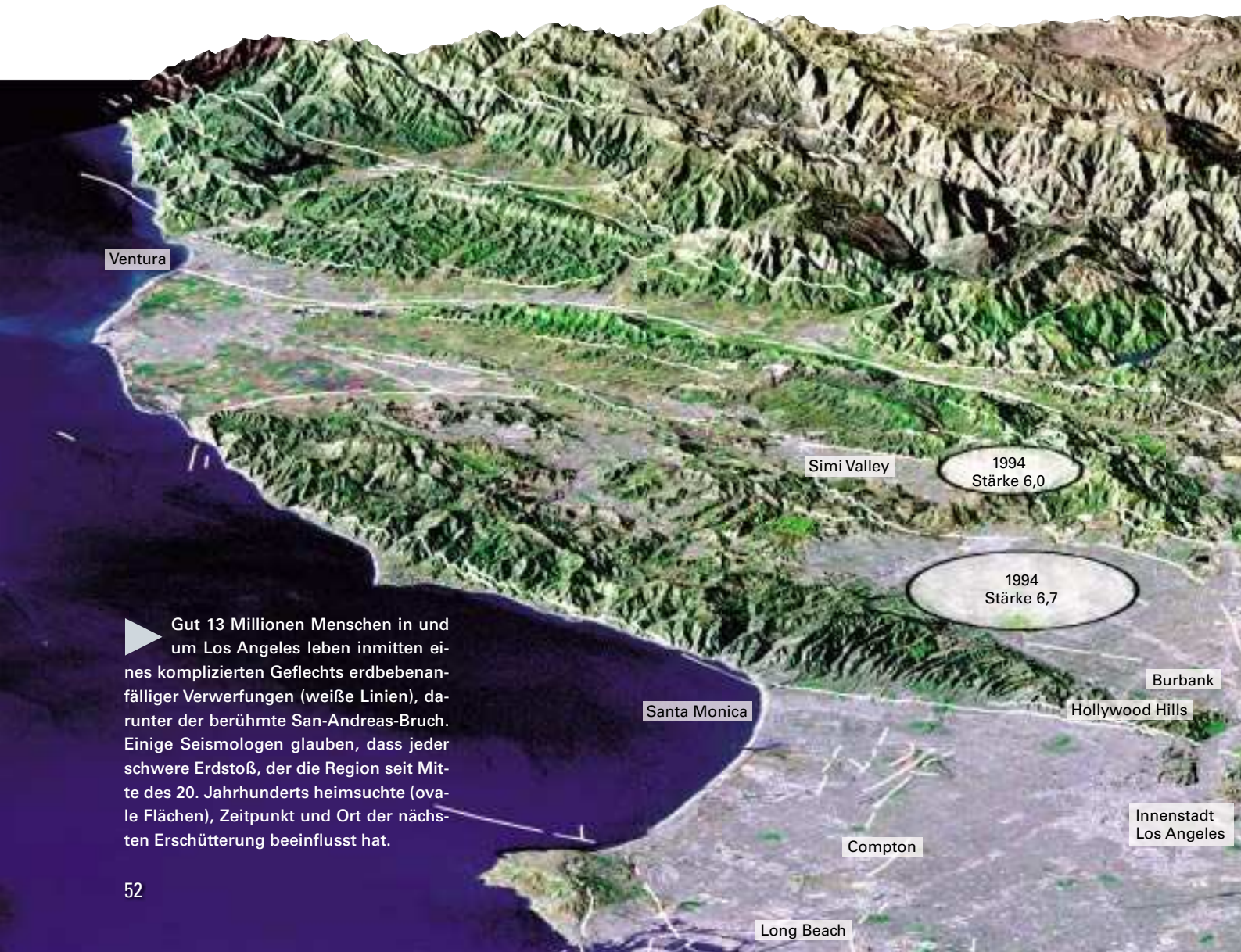
In Vivo Veritas: Electron Cryotomography of Cells. Von Jürgen M. Plitzko et al. in: Trends in Biotechnology, Bd. 20, Nr. 8 (Suppl.), S. 40, 2002.

Perspectives of Molecular and Cellular Electron Tomography. Von Abraham J. Koster et al. in: Journal of Structural Biology, Bd.120, S. 276, 1997.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Lauschangriff auf seismisches Geflüster

Im Widerspruch zur verbreiteten Ansicht können starke Erdbeben einander auf subtile Weise beeinflussen. Wenn verhakte Krustenblöcke sich ruckartig lösen, verlagert sich die gespeicherte Spannung in benachbarte Regionen und erhöht dort die Wahrscheinlichkeit für den nächsten Erdstoß. Ermöglicht das erstmals eine zuverlässige Bebenvorhersage?



Gut 13 Millionen Menschen in und um Los Angeles leben inmitten eines komplizierten Geflechts erdbebenanfälliger Verwerfungen (weiße Linien), darunter der berühmte San-Andreas-Bruch. Einige Seismologen glauben, dass jeder schwere Erdstoß, der die Region seit Mitte des 20. Jahrhunderts heimsuchte (ovale Flächen), Zeitpunkt und Ort der nächsten Erschütterung beeinflusst hat.

Von Ross S. Stein

Jahrzehntelang hegten Seismologen den Traum, irgendwann einmal fähig zu sein, Zeitpunkt und Ort des nächsten verheerenden Erdbebens vorherzusagen. Doch Anfang der 1990er Jahre schien sich diese Hoffnung endgültig zu zerschlagen. Damals wurde klar, wie ungeheuer komplex das Verhalten der Bruchzonen ist, an denen Erdstöße gewöhnlich auftreten. Und so kamen die Forscher zu dem ernüchternden Schluss, die schwersten Beben fänden stets isoliert und zufällig statt. Auch mit raffiniertester Technik könne daher niemand vorhersagen, wann das nächste zuschlägt.

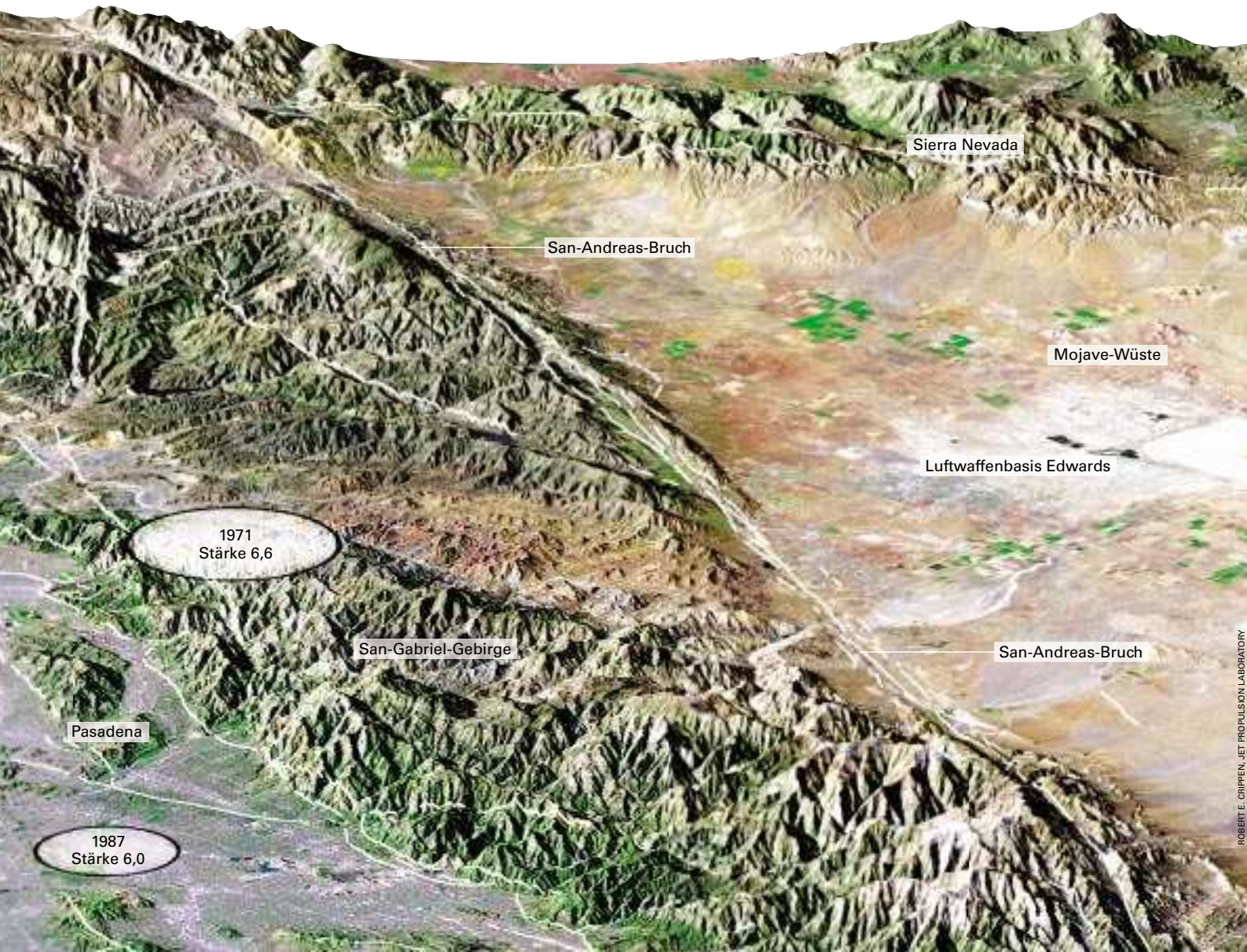
Kürzlich gab es jedoch wieder Grund zu vorsichtigem Optimismus. Überraschend zeigte sich, dass Erdbeben auf bisher ungeahnten Wegen miteinander kommunizieren können. Solche Wechselwirkungen aber sollten sich für Prognosen nutzen lassen.

Heute teilen die meisten Erdbebenforscher die Ansicht, dass eine Verwerfung, sobald ein stärkerer Erdstoß und die üblichen Nachbeben stattgefunden haben, so lange ruhig bleibt, bis die Spannung in der Erdkruste Zeit hatte, sich wieder aufzubauen. Meist dauert das Jahrhunderte bis Jahrtausende. Diese Feststellung gilt auch weiterhin. Aber die Entdeckung seismischer Wechselwirkungen lässt darauf schließen, dass die Wahrscheinlichkeit eines nachfolgenden Erdbebens anderswo entlang der Bruchzone oder an einer nahe gelegenen Verwerfung immerhin um den Faktor drei ansteigen kann. Für Katastrophenschützer oder Versicherungsunternehmen ist dies eine elektrisierende Erkenntnis – erlaubt es doch, Risiken sehr viel genauer und zuverlässiger abzuschätzen.

Auf den neu entdeckten Interaktionen baut eine Theorie auf, die als Stress-Triggering bezeichnet wird. In ihrem Mittelpunkt steht die Erkenntnis, dass bei der ruckartigen Verschiebung von Krustenblöcken an einer Verwerfung die freigesetzte Spannung (Stress) auf benachbarte Bruchzonen übergeht, wo sie ein Folgebeben auslösen (triggern) kann.

Meine Kollegen und ich haben Aufzeichnungen von Erdstößen gründlich analysiert und neue Berechnungen zum Verhalten von Verwerfungen angestellt. Dabei fanden wir heraus, dass die Spannung, die sich während eines Erdbebens löst, nicht einfach verschwindet. Vielmehr wandert sie die Verwerfung entlang und konzentriert sich in benachbarten Bereichen. Dies kann fatale Folgen haben: Untersuchungen von etwa zwei Dutzend Bruchzonen seit 1992 lassen darauf schließen, dass schon ein Anstieg der Spannung um ein Achtel des Luftdrucks in einem Autoreifen genügt, ein Erdbeben auszulösen.

Bis vor kurzem hielt niemand solche subtilen Kausalbeziehungen für möglich – und sie spielten bei der Bebenvorher- ▷



▷ sage denn auch keinerlei Rolle. Deshalb zögerten viele Wissenschaftler verständlicherweise, sie als Grundlage für einen neuen Ansatz zur Abschätzung seismischer Risiken heranzuziehen. Doch inzwischen ist die Glaubwürdigkeit der Stress-Triggering-Hypothese erheblich gestiegen; denn mit ihrer Hilfe vermochten meine Kollegen und ich Ort und Häufigkeit von Beben zu erklären, die diversen verheerenden Erdstößen in Kalifornien, Japan und der Türkei folgten. Das hat manchen Zweifler überzeugt. Aber auch wir wurden in unserem Streben ermutigt, die unerwarteten Wechselwirkungen zwischen Erdbeben immer besser verstehen und deuten zu lernen; denn präzisere Warnungen vor seismischen Katastrophen sind bitter nötig.

Vernachlässigte Nachbeben

Anfangs schien es geradezu vermessen, der gängigen Theorie zu widersprechen, dass stärkere Erdbeben zufällig stattfinden – hatten sich doch Hunderte von Forschern mehr als drei Jahrzehnte lang vergeblich bemüht, konsistente Muster in der globalen Erdbebenaktivität oder Seismizität zu entdecken. Einige suchten nach Änderungen in der Häufigkeit von kleineren Erschütterungen. Andere maßen mit empfindlichen Instrumenten, wie sich die Erdkruste neigt, ausdehnt und über Distanzen verschiebt, die zu klein sind, um mit bloßem Auge erkennbar zu sein. Wieder andere spürten Bewegungen von Gasen, Flüssigkeiten und elektromagnetischer Energie im Untergrund nach. Eine vierte Gruppe kartierte winzige Risse im Gestein, um festzustellen, ob diese sich vor größeren Erschütterungen öffnen oder schließen. Doch was auch immer die Forscher unter die Lupe nahmen, sie fanden wenig Übereinstimmung zwischen einem schweren Erdstoß und dem nächsten.

Trotz solcher Fehlschläge bleibt eines unübersehbar: Gut 30 Prozent der seismischen Ereignisse weltweit – nämlich die so genannten Nachbeben – häufen sich räumlich und zeitlich. Ihre Verteilung folgt einem regelmäßigen Muster, das der japanische Seismologe Fusakichi Omori schon 1894 erstmals beobachtet hat. In mathematischer Formulierung wird es heute als Omori-Gesetz bezeichnet. Danach ist die Wahrscheinlichkeit von Nachbeben direkt nach dem Hauptbeben am größten und nimmt dann exponentiell mit der Zeit ab: Nach zehn Tagen ist sie auf zehn und nach hundert Tagen auf ein Prozent des ursprünglichen Wertes gesunken und so weiter.

Dieser vorhersehbare sprunghafte Anstieg und allmähliche Abfall der Seismizität bedeutet aber nichts anderes, als dass der anfängliche Hauptstoß die Erdkruste so verändert, dass die Wahrscheinlichkeit nachfolgender Beben zunimmt – in klarem Widerspruch zu der These, wonach Erdbeben zeitlich zufällig verteilt sein sollen. Allerdings sind Nachbeben in der Regel schwächer und nicht so zerstörerisch wie die ursprünglichen Erschütterungen, um deren Vorhersage es den Wissenschaftlern eigentlich geht. Außerdem glaubte man bisher, dass sie alle irgendwo entlang jenes Abschnitts der Verwerfung auftreten, an dem die beiden Krustenplatten während des Hauptstoßes aneinander entlanggeschürft sind. Deshalb wurde lange übersehen, dass sie vielleicht den Schlüssel zum Rätsel der Seismizität darstellen.

Eine verborgene Gesetzmäßigkeit

Bleiben die Nachbeben außer Betracht, scheinen die verbleibenden Erdstöße in der Tat – zumindest auf den ersten Blick – zufällig aufzutreten. Doch warum sollte man die am besten vorhersagbaren Ereignisse ignorieren, um zu beweisen, dass der Rest keiner Regel folgt? Meine Kollegen und ich beschlossen stattdessen zu ergründen, was Nachbeben so regelmäßig macht. Wir begannen unsere Analyse in einer der seismisch aktivsten Regionen der Erde: dem System des San-Andreas-Bruchs, der quer durch Kalifornien verläuft. Aus örtlichen Aufzeichnungen der häufigen Bodenschwankungen in diesem Gebiet ergab sich, dass am Tag, der auf ein Beben der Stärke 7,3 folgt, die Wahrscheinlichkeit eines weiteren heftigen Erdstoßes im Umkreis von hundert Kilometern fast 67 Prozent beträgt – das 20 000fache des Wertes an einem beliebigen anderen Tag. Irgendetwas am ersten Beben scheint also das Risiko weiterer Erdstöße dramatisch emporschnellen zu lassen, aber was?

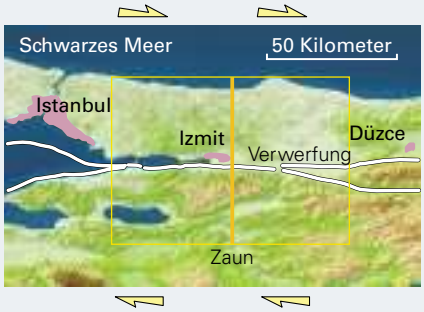
Das wohlbekannte Phänomen der Nachbeben erklärt auch, warum zunächst niemand überrascht war, als im Juni 1992 ein Erdstoß der Stärke 6,5 in der Nähe der südkalifornischen Stadt Big Bear nur drei Stunden nach einem Beben der Stärke 7,3 stattfand, welches

IN KÜRZE

- Nach herkömmlicher Meinung beeinflusst ein schweres Erdbeben weder Zeit noch Ort des nächsten; doch **neue Befunde** wecken Zweifel an dieser Ansicht.
- Verwerfungen, an denen seismische Erschütterungen auftreten können, haben sich als **unerwartet sensibel** gegenüber leichten Spannungen erwiesen, die sich als Folge von Erdbeben an nahe gelegenen Verwerfungen auf sie verlagern.
- Bei ansonsten gleichen Bedingungen sind diejenigen Bereiche der Erdkruste, wo die Spannung – und sei es nur minimal – ansteigt, die Stellen, an denen die **nächsten Erdbeben** stattfinden.
- Diese Erkenntnis könnte helfen, das **Erdbebenrisiko** für eine Region oder Stadt deutlich besser einzuschätzen als bisher.

Zum Zerreißen gespannt

Der langsame Aufbau und die plötzliche Freisetzung von Spannungen an der Grenze tektonischer Platten, die aneinander entlangdriften, sind die Ursache aller schweren Erdbeben. An der Nordanatolischen Verwerfung in der Türkei (weiße Linie) bewegt sich die nördlich gelegene Eurasische relativ zur Anatolischen Platte im Süden um durchschnittlich zwei bis drei Zentimeter pro Jahr nach Osten (gelbe Pfeile). Diese Scherbewegung wird jedoch an der Verwerfung gebremst. So entsteht eine zunehmende Spannung. Wenn sie schließlich stärker wird als die Reibung entlang der Verwerfung, verschieben sich die Gesteinspakete auf beiden Seiten in einem jähen Ruck gewaltsam gegeneinander. Ein katastrophales Beispiel für diesen Vorgang fand am 17. August 1999 statt, als ein Erdstoß der Stärke 7,4 im Umkreis der Stadt Izmit 25 000 Menschenleben forderte. Berechnungen der tektonischen Kräfte vor und nach dem Ereignis (unten) zeigen, wie dabei die so genannte Coulomb-Spannung längs des gescherten Segments der Verwerfung abnahm, seitlich davon jedoch anstieg.



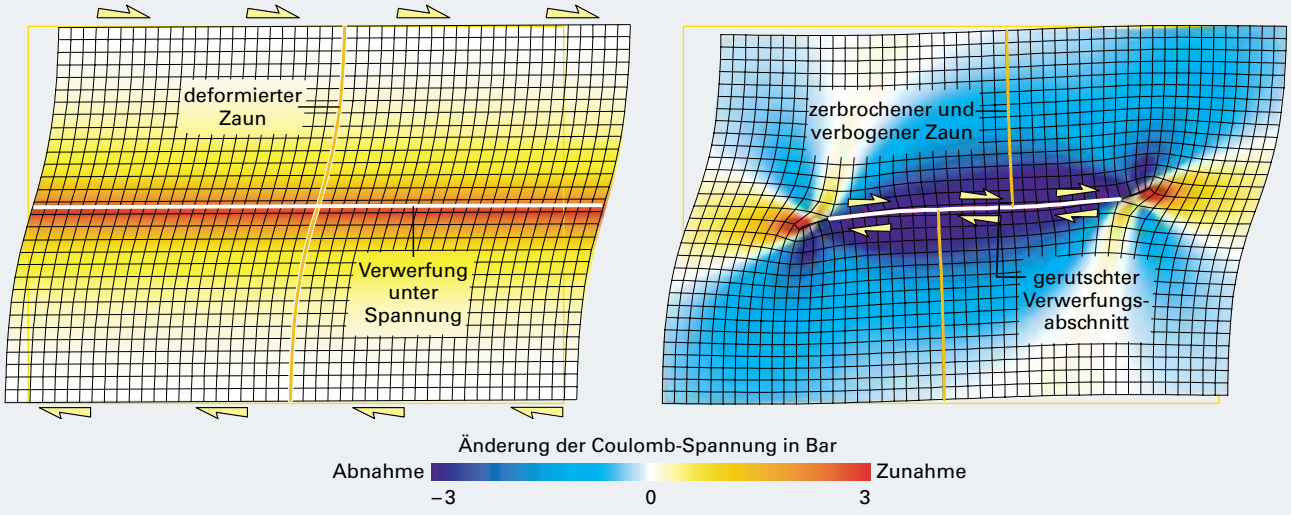
Erdbeben von Izmit 1999

Vor dem Erdbeben

Im Abschnitt der Nordanatolischen Verwerfung bei Izmit hatte sich seit dem letzten stärkeren Erdstoß vor 200 Jahren eine Menge Spannung (rot) aufgebaut. Sie ist hier durch die Verformung eines über die Landschaft gelegten imaginären Maschendrahtzauns veranschaulicht. Quadrate entlang der Verwerfung wurden zu Parallelogrammen verzerrt (15 000fach übertrieben dargestellt). Die größte Deformation – und damit Spannung – tritt direkt an der Verwerfung auf.

Nach dem Erdbeben

Das Erdbeben löste auf der gesamten Länge des gescherten Abschnitts der Verwerfung die vorher aufgebaute Spannung. Bildhaft betrachtet, zerriss der deformierte Zaun, wurde um mehrere Meter versetzt und dann erneut zusammengefügt. Die Maschen beidseits des gescherten Segments nahmen dabei wieder ihre ursprüngliche quadratische Form an. Die Spannung hat sich an die Enden dieses Abschnitts verlagert, wo die Maschen nun noch stärker verzerrt sind als vor dem Beben.



SERKAN BOZKURT

das 40 Kilometer entfernte Landers erschüttert hatte. Im Widerspruch zur gängigen Theorie fand das Big-Bear-Beben allerdings weit entfernt von der Verwerfung statt, die beim Landers-Beben aufgebrochen war. Also erfüllte es zwar die Voraussetzungen eines Nachbebens, was den Zeitpunkt, nicht aber was den Ort betraf. In dieser räumlichen Abweichung vermuteten wir einen Fingerzeig auf die verborgene Gesetzmäßigkeit, nach der wir suchten.

Als meine Kollegen und ich die Epizentren Hunderter weiterer Erdstöße in Kalifornien kartierten, entdeckten wir ein bemerkenswertes Muster in der Verteilung echter Nachbeben, aber auch anderer, schwächerer Erschütterungen, die einem Hauptstoß im Abstand von Tagen, Wochen oder gar Jahren folgten. Die meisten häuften sich in Gebieten, die wie beim Ereignis von Big Bear weit von der aufgebrochenen Verwerfung und damit der Zone, in der Nachbeben zu erwarten waren, entfernt lagen (siehe Kasten auf Seite 58). Falls wir herausbekämen, was ihre Verteilung bestimmte, sollten die gleichen Faktoren auch das Auftreten der Hauptbeben selbst beeinflussen. Und wenn das stimmte, waren wir einem radikal neuen Ansatz zur Vorhersage von Erdbeben auf der Spur.

Auf der Suche nach den tieferen Zusammenhängen schauten wir uns zunächst Änderungen innerhalb der Erdkruste als Folge starker Erdbeben an. Bei diesen entlädt sich ein Teil der Spannung, die sich allmählich aufgebaut hatte, während die benachbarten tektonischen Platten aneinander entlanggedriftet sind. Zum Beispiel wandert längs des San-Andreas-Bruchs die Nordamerikanische Platte relativ zur Pazifischen nach Süden. Während die beiden Krustenblöcke sich in entgegengesetzte Richtungen bewegen, erzeugen sie einen Scherdruck parallel zur Verwerfungsebene. Meist werden zugleich die Gesteinspakete auf ▷

Fortschritte in der Bebenvorhersage

Viele Aspekte von Erdbeben sind noch unklar. Das erschwert zuverlässige Risikoprognosen. Die meisten heutigen Risikoanalysen für Erdbeben unterstellen, dass keine kausale Verknüpfung zwischen räumlich oder zeitlich benachbarten seismischen Erschütterungen besteht. Für jeden Abschnitt einer Verwerfung ermitteln die Seismologen anhand historischer Daten die durchschnittliche Zeitspanne zwischen zwei Erdbeben. Wann genau das nächste auftritt, entscheidet jedoch der Zufall. Dadurch ergibt sich für die Anzahl der erwarteten Erdstöße in einem bestimmten Zeitraum eine so genannte Poisson-Verteilung.

Das Nützlichste an dieser Methode ist, dass sie auch dann einen Wert für das Risiko liefert, wenn nicht bekannt ist, wann das letzte bedeutende Erdbeben stattfand. Die Wahrscheinlichkeitswerte ändern sich nämlich nicht mit der Zeit.

AFB CORBIS

Zahlreiche Gebäude in der türkischen Stadt Düzce stürzten bei einem schweren Erdbeben im November 1999 ein. Möglicherweise wurde die Katastrophe durch das vorangegangene Beben bei Izmit ausgelöst.

Eine etwas raffiniertere Vorhersagemethode, die unter dem Schlagwort Renewal Probability (Wahrscheinlichkeit eines erneuten Auftretens) firmiert, geht hingegen davon aus, dass das Risiko eines verheerenden Erdbebens mit der seit der letzten Erschütterung verstrichenen Zeit ansteigt. Dahinter steckt die Annahme, dass sich die Spannung entlang einer Verwerfung bei einem größeren Erdstoß löst und danach allmählich wieder zunimmt.

Der Autor und seine Kollegen bauen auf dieser Methode auf, berücksichtigen jedoch zusätzlich die Wechselwirkungen zwischen Erdbeben, indem sie die Folgen von Spannungsänderungen durch vorangegangene seismische Erschütterungen in der Nähe einbeziehen. Ein Vergleich der drei Prognosemethoden für die Nordanatolische Verwerfung in der Türkei (rechts) illustriert die Unterschiede zwischen ihnen; am deutlichsten zeigen sie sich unmittelbar nach einem schweren Erdstoß.

Nach der Renewal-Probability-Analyse war bis zum August 1999 die Wahrscheinlichkeit für ein Beben der Stärke 7 oder mehr an den vier Verwerfungen in der 50-Kilometer-Zone um Istanbul langsam angestiegen, da das letzte solche Ereignis schon 100 bis 500 Jahre zurücklag. Der katastrophale Erdstoß vom August 1999 ließ das Risiko eines zweiten starken Bebens in der unmittelbaren Umgebung von

▷ den gegenüberliegenden Seiten der Verwerfung gegeneinander gepresst. Dadurch üben sie einen weiteren Druck aus, der senkrecht zur Bruchebene gerichtet ist.

Wenn nun der Scherdruck den Bruchwiderstand an der Verwerfung übersteigt oder der seitliche Anpressdruck nachlässt, gleiten die verkeilten Gesteinspakete plötzlich ruckartig aneinander vorbei und setzen gewaltige Energiemengen in Form von Vibrationen frei. Beide Druckkomponenten, deren Summe Coulomb-Spannung genannt wird, nehmen entlang des aufreißenden Abschnitts der Verwerfung ab. Da aber die Spannung nicht einfach verschwinden kann, muss sie sich anderswohin verlagern. Unsere Vermutung war nun, dass ihre Zunahme an den neuen Positionen ausreichen könnte, um dort weitere Erdbeben auszulösen.

Geophysiker hatten Coulomb-Spannungen schon seit Jahren berechnet, sie aber für zu gering gehalten, um Einfluss auf die Seismizität zu haben. Tatsächlich ist das Ausmaß der verlagerten Spannung im Allgemeinen recht klein – mit maximal drei Bar entspricht es höchstens zehn Prozent der gesamten Druckänderung, die in Bruchzonen im Verlauf eines Erdbebens stattfindet. Auch mir schien das zunächst nicht auszureichen, das Aufbrechen einer Verwerfung auszulösen. Doch als ich zusammen mit Geoffrey King vom Geophysikalischen Institut Paris und Jian Lin von der Oceanographic Institution in Woods Hole (Massachusetts) berechnete, an welchen Stellen Südkaliforniens die Spannung nach stärkeren Erdbeben gestiegen war, entdeckten wir zu unserer Verblüffung, dass die – geringen, aber vorhandenen – Zunahmen durchweg in Gebieten auftraten, in denen sich anschließend weitere Erschütterungen gehäuft hatten. Auch die umgekehrte Korrelation galt: Selbst ein kleiner Spannungsabfall in einer Region konnte künftige Beben dort verhindern. Auf unseren Karten nahm die seismische Aktivität in diesen so genannten Druckschatten ab.

Erdbeben nach dem Dominoprinzip

Durch die Analyse der Coulomb-Spannung ließ sich die räumliche Verteilung bestimmter Erdbeben in der Vergangenheit also sehr schön erklären. Aber taugte die Methode auch zur Vorhersage des genauen Ortes künftiger Erschütterungen? Vor sechs Jahren tat ich mich mit dem Geophysiker James H. Dieterich vom Geologischen Dienst der USA und dem Geologen Aykut A. Barka von der Technischen Universität Istanbul zusammen, um die Nordanatolische Verwerfung in

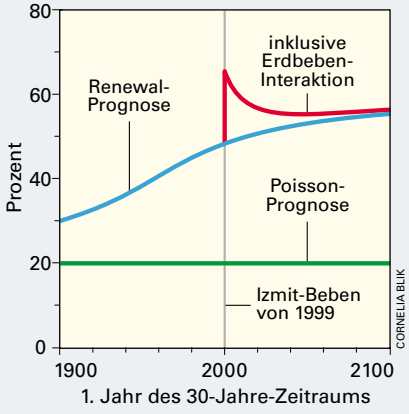
Izmit drastisch absinken, weil es dort zu einer Entspannung kam.

Dagegen blieb im hundert Kilometer westlich gelegenen Istanbul die Gefahr einer schweren Erschütterung während der nächsten 30 Jahre beim vorherigen Wert von 48 Prozent. Diese Wahrscheinlichkeit wird mit der Zeit langsam weiter zunehmen. Dagegen verharrt sie bei der Poisson-Methode unverrückbar bei nur 20 Prozent – gleichgültig was in der Nähe der türkischen Hauptstadt passiert.

Die Stress-Triggering-Hypothese liefert noch ein anderes Bild. Der größte Unterschied zur Vorhersage mit der Renewal-Probability-Methode ergibt sich für die Zeit unmittelbar nach der Izmit-Katastrophe. Dieses Ereignis ließ die Wahrscheinlichkeit eines Folgebebens, das Istanbul erschüttern könnte, abrupt in die Höhe schießen. Ein Teil der beim Izmit-Beben gelösten Spannung verlagerte sich nämlich entlang der Nordanatolischen Verwerfung nach Westen in Richtung Istanbul. Damit schnellte dort das Risiko eines Erdbebens innerhalb der nächsten 30 Jahre von 48 auf 62 Prozent empor.

Diese so genannte Interaktions-Wahrscheinlichkeit ist seither wieder leicht gefallen und wird es vorerst weiter tun. Dagegen steigt der Risikowert nach der Renewal-Probability-Methode immer noch langsam, aber stetig an. Die beiden Kurven werden sich im Jahr 2060 bei etwa 54 Prozent schließlich wieder vereinigen – vorausgesetzt, das nächste schwerere Erdbeben findet nicht schon vorher statt.

Risiko eines schweren Bebens in den nächsten 30 Jahren



Das Risiko eines schweren Erdbebens im Bereich von 50 Kilometern um Istanbul in den nächsten 30 Jahren variiert je nach Vorhersagemethode drastisch. Bei herkömmlichen Verfahren bleibt es gleich oder steigt langsam an (grün und blau). Wird die beim Beben von Izmit 1999 verlagerte Spannung berücksichtigt, ergibt sich ein sprunghafter Anstieg, gefolgt von einem vorübergehenden Abfall (rot).

der Türkei zu untersuchen, eine der am dichtesten besiedelten Bruchzonen der Welt. Wir berechneten, wo die Coulomb-Spannung infolge früherer Erdbeben gestiegen war. Anhand der Ergebnisse prognostizierten wir, dass mit einer Wahrscheinlichkeit von zwölf Prozent irgendwann zwischen 1997 und 2027 ein Beben von mindestens der Stärke 7 das Segment nahe der Stadt Izmit erschüttern würde. Das mag sich nach einer relativ vagen Aussage anhören. Doch für den Rest der tausend Kilometer langen Bruchzone, abgesehen von einem weiteren Abschnitt, betrug die Wahrscheinlichkeit nur ein bis zwei Prozent.

Wir mussten nicht lange auf die Bestätigung warten. Im August 1999 verwüstete ein Erdbeben der Stärke 7,4 Izmit. Es forderte 25 000 Todesopfer und richtete Sachschäden im Wert von mehr als 6,5 Milliarden Dollar an. Dabei war es nur das jüngste in einer Serie von zwölf stärkeren Beben, die seit 1939 nach dem Dominoprinzip die nordanatolische Verwerfung heimgesucht hatten. In einem besonders schlimmen Zeitraum von fünf Jahren gab es bei vier nach Westen fortschreitenden, verheerenden Erdstößen auf insgesamt 700 Kilometern Länge Scherbrüche entlang dieser Störungslinie. Unserer Theorie zufolge löste Spannung, die sich über das Ende des neu aufgerissenen Segments hinaus verschob, jeweils das nachfolgende Erdbeben aus – so auch das von Izmit.

Schon im November 1999 fiel der 13. Dominostein. Coulomb-Spannung, die sich von dem Abschnitt bei Izmit verlagert hatte, löste etwa hundert Kilometer weiter östlich nahe der Stadt Düzce ein Erdbeben der Stärke 7,1 aus. Zum Glück hatte Barka die Spannungszunahme berechnet, die sich aus dem Beben von Izmit ergab, und sie zwei Monate zuvor in der Zeitschrift »Science« veröffentlicht. Seine Vorhersage veranlasste die örtliche Bauaufsicht, Schulgebäude in Düzce zu schließen, die beim ersten Beben leicht beschädigt worden waren – ungeachtet des Einwandes der Schulbehörde, der Unterricht könne nirgendwo sonst stattfinden. Einige dieser Gebäude stürzten beim November-Beben ein.

Falls spätere Berechnungen von Tom Parsons vom Geologischen Dienst der USA, Shinji Toda vom Forschungszentrum für aktive Verwerfungen in Tsukuba (Japan), Barka, Dieterich und mir korrekt sind, dürfte das nicht die letzte Nachwirkung des Bebens von Izmit gewesen sein. Die dabei verlagerte Spannung hat auch die Wahrscheinlichkeit, dass innerhalb des nächsten Jahres die nahe gelegene Hauptstadt Istanbul erschüttert wird, von 1,9 Prozent auf 4,2 Prozent erhöht. Für die kommenden 30 Jahre veranschlagen wir dieses Risiko auf 62 Prozent. Unter der Annahme, dass starke Beben zufällig auftreten, läge der Schätzwert dagegen nur bei 20 Prozent (siehe Kasten nebenan).

Ruhe im Spannungsschatten

Die Stress-Triggering-Hypothese kann aber nicht nur Gefahren aufzeigen, sondern auch Entwarnung geben. Wenn in bestimmten Regionen das Erdbebenrisiko steigt, nimmt es in anderen zwangsläufig ab. Zufällig sind in der Türkei die Gebiete mit geringerem Erdbebenrisiko leider viel dünner besiedelt als der Großraum von Istanbul. Manchmal trifft aber auch das Gegenteil zu.

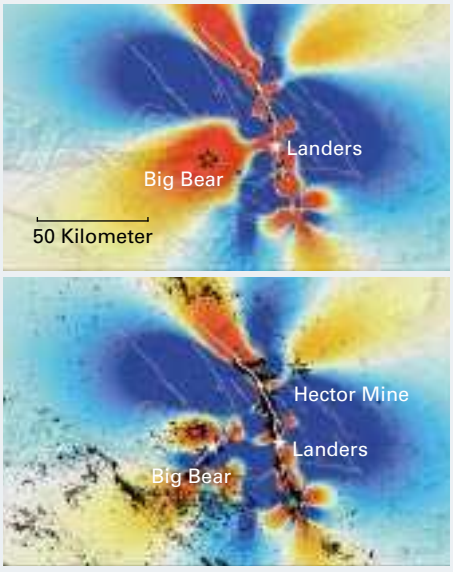
Eines der eindrucksvollsten Beispiele ist die Bucht von San Francisco, die sich seit dem verheerenden Erdbeben der Stärke 7,9 von 1906 einer relativ geringen Seismizität erfreut. Heute leben hier 5 Millionen Menschen. Einer Analyse zufolge, die meine Kollegen Ruth A. Harris und Robert W. Simpson vom Geologischen Dienst der USA 1998 durchgeführt haben, fiel der Spannungsschatten des Bebens von 1906 über verschiedene Küstenstreifen, die im Bereich der Bucht von San Francisco parallel zum San-Andreas-Bruch verlaufen. Spannungszunahmen gab es hingegen ein gutes Stück nördlich und südlich. Dies könnte erklären, warum die Häufigkeit zerstörerischer Erdstöße seit 1906 nur rund ein Zehntel des Wertes in den 75 Jahren davor betrug. Allerdings tritt die ▷

▷ Region langsam aus dem Seismizitätsschatten, weil sich die Spannung an den Verwerfungen wieder aufbaut. Das Loma-Prieta-Beben von 1989 mit seinen eingestürzten Highways mag ein Vorbote dieses Wiedererwachens gewesen sein.

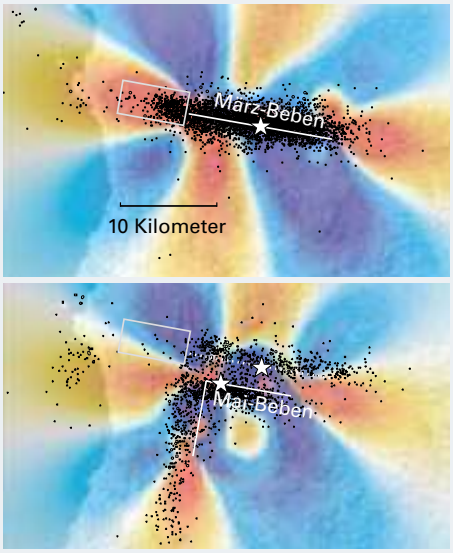
Untersuchungen der Erdbeben in der Türkei und in Südkalifornien bestärkten uns in der Überzeugung, dass selbst winzige Spannungsänderungen die Gefahr einer Katastrophe drastisch erhöhen oder verringern können. Doch trotz der steigenden Zahl von Beispielen, die unsere Theorie stützten, blieb ein wunder Punkt: Ungefähr ein Viertel der von uns untersuchten Erdbeben fand in Gebieten statt, wo die Spannung abgenommen hatte. Skeptische Kollegen konnten uns diesen Widerspruch genüsslich unter die Nase reiben. Wir haben inzwischen jedoch eine Erklärung dafür gefunden. Auch in den Schattenbereichen sinkt die Seismizität nie völlig auf null; vielmehr nimmt nur die Zahl der Erdbeben pro Zeiteinheit ab. Das Analoge gilt für die Stress-Triggering-Zonen: Die Bebenrate steigt zwar an, bleibt aber unter dem theoretischen Maximum.

Erdbebenschwärme

Wo nach schweren Erdbeben (gefüllte Sterne) die Spannung ansteigt (rot), finden oft weitere Erdstöße statt, sowohl starke (offene Sterne) als auch schwache (schwarze Punkte). Wo die Spannung abfällt (blau), ereignen sich dagegen nur wenige seismische Erschütterungen – gleichgültig ob es in der Nähe Verwerfungen (weiße Linien) gibt.



Südkalifornien (USA)
Ein Erdstoß der Stärke 7,3 in der südkalifornischen Wüste bei Landers im Jahre 1992 erhöhte die zu erwartende Bebenhäufigkeit in südwestlicher Richtung. Dort kam es drei Stunden später zum Beben von Big Bear mit der Stärke 6,5 (oben). Genau in den Regionen, in die sich auf Grund der beiden Erschütterungen die Spannung im Boden verlagerte, fand innerhalb der nächsten sieben Jahre die überwiegende Mehrheit der Erdstöße statt. Den Höhepunkt bildete das Hector-Mine-Beben der Stärke 7,1 (unten).



Kagoshima (Japan)
Räumlich und zeitlich benachbarte Beben können die Häufigkeit von Erdstößen, also die Seismizität, an ein und derselben Stelle schlagartig steigen und ebenso rasch wieder sinken lassen. Zum Beispiel erhöhte im März 1997 ein Beben der Stärke 6,5 Spannung und Seismizität im Westen der aufgebrochenen Verwerfung bei Kagoshima (oben). Beide Messgrößen fielen nach einem Erdstoß der Stärke 6,3, der 48 Tage später drei Kilometer weiter südlich stattfand, wieder steil ab (unten).

SERKAN BOZKURT, KEITH RICHARDS-DINGER, SHINJI TODA

Wir verdanken diese Erweiterung unserer Vorstellungen einer Theorie, die Dieterich 1994 veröffentlicht hat. Als Rate/State-Reibung bekannt, wirft sie die gängige Vorstellung über Bord, dass die Reibung nur zwischen zwei Werten variieren kann – einem hohen, wenn das Material in Ruhe ist, und einem niedrigen, wenn es gleitet. Vielmehr werden Verwerfungen zäher oder glitschiger, wenn sich die Geschwindigkeit (rate) und der Ablauf – oder Zustand (state) – der Bewegung entlang des Bruchs ändert. Dies ergaben Laborexperimente, bei denen Dieterichs Team einen Miniaturbruch in eine Granitscheibe von der Größe eines Volkswagens sägte und winzige Erdbeben auslöste.

Ein Erdbebenpaar als Kippschalter

Wird die Seismizität unter der Annahme berechnet, dass die Reibung nicht konstant, sondern variabel ist, zeigt sich, dass Omoris Gesetz eine fundamentale Eigenschaft nicht nur so genannter Nachbeben, sondern aller seismischen Erschütterungen beschreibt. Dann offenbart sich auch der tiefere Grund, warum der plötzliche Anstieg der Bebenhäufigkeit infolge einer örtlichen Spannungszunahme nicht bestehen bleibt, sondern exponentiell wieder abnimmt. Doch Dieterichs Theorie enthüllt auch die komplementäre Eigenschaft der Seismizität, die Omoris Gesetz völlig außer Acht lässt: Wo ein Erdstoß Spannung abbaut, fällt die Bebenhäufigkeit zunächst steil ab und kehrt dann langsam in vorhersehbarer Weise zu den früheren Werten zurück. Diese neuen Einsichten versetzten uns erstmals in die Lage, den Zeitfaktor in unsere Vorhersagen einzubeziehen. Solange wir nur die Coulomb-Spannungen berechneten, konnten wir zwar grob vorhersagen, wo weitere Erdbeben auftreten, aber nicht wann.

Anfang letzten Jahres ermittelte Parsons für die mehr als hundert seismischen Erschütterungen der Stärke 7 oder mehr, die weltweit in den vergangenen 25 Jahren stattgefunden haben, alle nachfolgenden Erdstöße im Umkreis von weniger als 250 Kilometern, die mindestens eine Stärke von 5 erreichten. Unter den gut 2000 Ereignissen in seiner Liste traten 61 Prozent dort auf, wo ein vorausgegangenes Beben den Druck – wenn auch teils nur geringfügig – erhöht hatte. Die wenigsten dieser getriggerten Erdstöße fanden dicht genug

beim Hauptstoß statt, um als Nachbeben zu gelten. Und in allen Fällen nahm ihre Häufigkeit so ab, wie die Theorie der Rate/State-Reibung und das Omori-Gesetz das vorhersagten. Unsere Vorstellungen über Ort und Zeitpunkt spannungsgetriebener Erdbeben wurden dadurch glänzend bestätigt.

Nachdem wir das Konzept der Rate/State-Reibung nun routinemäßig in unsere Analysen einbeziehen, vermögen wir auch kompliziertere Beispiele einer Interaktion zwischen Erdbeben aufzudecken, als es durch die bloße Analyse der Coulomb-Spannung möglich war. Damals konnten wir nur relativ einfache Situationen wie in Kalifornien und in der Türkei erklären, wo ein starkes Erdbeben die Seismizität in einigen Gebieten gesteigert und in anderen abgeschwächt hat. Ein überzeugenderer Beweis für die Stress-Triggering-Hypothese wäre ein Fall, bei dem aufeinander folgende Erdstöße vergleichbarer Stärke die Häufigkeit von Erdbeben an ein und derselben Stelle erst kräftig erhöhen und dann ebenso deutlich absenken – ähnlich wie durch Drehen am Dimmer eine Lampe hell aufleuchtet und wieder verglimmt.

Tatsächlich entdeckten Toda und ich ein spektakuläres Beispiel für dieses Phänomen, das wir Kippschalter-Seismizität nennen. Anfang letzten Jahres begannen wir mit der Analyse eines Erdbebenpaares der Stärke 6,5, das 1997 Kagoshima in Japan heimgesucht hatte. Unmittelbar nach dem ersten Beben im März schnellte in einem 25 Quadratkilometer großen Gebiet, das genau hinter dem westlichen Ende des aufgebrochenen Abschnitts der Verwerfung lag, die Seismizität in die Höhe. Als wir berechneten, wohin sich die beim Erdstoß freigesetzte Spannung verlagert hatte, ergab sich genau diese Region erhöhter Seismizität. Außerdem stellten wir fest, dass auch der allmähliche Abfall der Bebenhäufigkeit nach dem plötzlichen Anstieg den Vorhersagen folgte, die sich aus dem Konzept der Rate/State-Reibung ergaben.

Als aber nur sieben Wochen später drei Kilometer weiter südlich die zweite Erschütterung auftrat, fiel die Häufigkeit der Erdstöße in dem Gebiet erhöhter Seismizität jäh um mehr als 85 Prozent ab. Der Grund: Die Trigger-Zone des ersten Bebens war in den Schattenbereich des zweiten gefallen. Das erste hatte also die Seismizität auf- und das zweite sie wieder abgedreht.

Ein Bebenpaar entlang der Denali-Verwerfung in Alaska im Herbst 2002 bietet dagegen den bisher besten Beleg für einen kausalen Zusammenhang zwischen zwei starken Erdstößen. Unseren Berechnungen nach erhöhte die erste Erschütterung mit einer Stärke von 6,7 am 23. Oktober die Wahrscheinlichkeit für die zweite am 3. November, die sogar eine Magnitude von 7,9 erreichte, um den Faktor 100.

Entwicklung der Wettervorhersage liefert Vorbild

Eines haben unsere Lauschangriffe auf das geheimnisvolle Geflüster zwischen Erdbeben jedenfalls bewiesen: dass die Seismizität hochgradig interaktiv ist. Und auch wenn diese Wechselwirkungen vielleicht nicht allein auf der Verlagerung von Spannungen beruhen, halten meine Kollegen und ich unsere Befunde doch für ausreichend, um eine gründliche Überprüfung der herkömmlichen stochastischen Erdbebenvorhersagen zu rechtfertigen. Indem die neuen Methoden berücksichtigen, dass die Wahrscheinlichkeit gefährlicher Erdstöße auch von kleinen Spannungsänderungen an den Verwerfungen abhängt, ermöglichen sie genauere Risikoabschätzungen – ein Fortschritt, an dem Behörden, Versicherungsbranche und breite Öffentlichkeit nur das größte Interesse haben können.

Traditionelle Bewertungen dienen heute schon als Grundlage für Entscheidungen, wo Vorsichtsmaßnahmen wie erdbebensicheres Bauen zu ergreifen sind und wo nicht. Doch unsere Analysen haben gezeigt, dass die Stress-Triggering-Theorie andere Bruchzonen oder deren Segmente in der Rangliste der gefährlichsten Killer ganz nach oben befördert. Umgekehrt mag eine Verwerfung, die nach der traditionellen Bewertung hochbrisant erscheint, in Wahrheit ein viel geringeres Risiko bergen.

Leider ist jede Art von Erdbebenvorhersage schwer zu bestätigen und fast unmöglich zu widerlegen. Unabhängig von den berücksichtigten Faktoren hängt es in hohem Maße vom Zufall ab, ob die Prognose eintrifft – genauso wie es Sache des Zufalls ist, ob bei einer bestimmten Wetterlage ein mit hoher Wahrscheinlichkeit zu erwartender Regenguss auch wirklich niedergeht. Dabei genießen die Meteorologen gegenüber den Erdbebenforschern einen großen Vorteil: Sie verfügen über millionenfach mehr Messwerte, auf die sie ihre Vorhersagen stützen können. Wetterdaten sind letztlich viel einfacher zu ermitteln als Spannungen im Erdinneren, und Stürme finden weit öfter statt als Erdbeben.

Dennoch muss sich, wer das Erdbebenrisiko genauer eingrenzen will, am Vorbild der Wettervorhersage orientieren. Deshalb hat sich mein Team daran gemacht, eine Sammlung von Prognosen für schwere Erdstöße im Umkreis der stark gefährdeten Städte Istanbul, Landers, San Francisco und Kobe anzulegen. Wir bemühen uns ferner um Voraussagen für Los Angeles und Tokio, wo ein schweres Beben Schäden in Höhe von einigen Billionen Dollar anrichten könnte. Zu guter Letzt erproben wir unsere Theorie auch an schwächeren, ungefährlichen Erdbeben, die zahlreicher und daher leichter vorherzusehen sind.

Inwieweit eine noch so fundierte Risikoabschätzung hilft, Menschen und Sachwerte zu schützen, ist immer noch ungewiss. Doch wir Wissenschaftler haben allen Grund, den alten Traum, eines Tages schwere Erdstöße vorhersagen zu können, weiterzuverfolgen: Mehrere hundert Millionen Menschen leben und arbeiten längs der aktivsten Verwerfungszonen der Erde. Da so viel auf dem Spiel steht, sollte das Stress-Triggering – oder jedes andere Phänomen, das die Wahrscheinlichkeit eines verheerenden Erdbebens beeinflussen kann – nicht einfach ignoriert werden. ◁

Ross S. Stein arbeitet als Geophysiker beim Erdbebenrisikoteam des Geologischen Dienstes der USA in Menlo Park (Kalifornien). Im Jahr 2000 erhielt er den Eugene M. Shoemaker-Preis für herausragende Leistungen des Geologischen Dienstes.

Response of the San Andreas Fault to the 1983 Coalinga-Nuñez Earthquakes: An Application of Interaction-Based Probabilities for Parkfield. Von S. Toda and Ross S. Stein in: Journal of Geophysical Research, Bd. 107, 10.1029/2001JB000172 (2002).

Heightened Odds of Large Earthquakes Near Istanbul: An Interaction-Based Probability Calculation. Von T. Parsons et al. in: Science, Bd. 288, S. 661 (2000).

Earthquakes Cannot Be Predicted. Von R. J. Geller, D. D. Jackson, Y. Y. Kagan und F. Mulargia in: Science, Bd. 275, S. 1616; 14.3.1997.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Rätsel Kleinhirn

Hirnforscher haben das Kleinhirn bisher verkannt. Diese tennisballgroße Struktur beteiligt sich an einer Palette verschiedenster Gehirnfunktionen wie dem Zeit- und dem Tastempfinden. Womöglich spielt sie sogar bei Autismus und Schizophrenie eine wichtige Rolle.

Von James M. Bower
und Lawrence M. Parsons

Hinten im Schädel, unter den beiden Großhirnhemisphären, sitzt auf dem Hirnstamm ein tennisballgroßer, bohnenförmiger Klumpen aus grauer und weißer Hirnmasse. Das ist das Cerebellum, das Kleinhirn.« So begann vor nicht einmal fünfzig Jahren ein Artikel im Scientific American. Der Autor fuhr dann fort: »Im Gegensatz zum Großhirn, in dem die Forschung die Zentren so vieler wichtiger geistiger Funktionen ausfindig gemacht hat, bleibt das Kleinhirn rätselhaft. Seine Bedeutung entzieht sich der Wissenschaft.«

Keine zwanzig Jahre später schrieb ein anderer Hirnforscher an gleicher Stelle: »Es besteht kein Zweifel mehr – das Kleinhirn stellt eine zentrale Kontrollstelle für die Organisation von Bewegungen, für Motorik, dar.«

Nachdem seither wiederum einige Jahrzehnte verstrichen sind, ist die Diskussion um die Bedeutung des Cerebellums erneut entbrannt. Viele Hirnforscher würden heute die klare Aussage ihres Kollegen von vor dreißig Jahren so nicht mehr gelten lassen. Zahlreiche neue Forschungsergebnisse deuten darauf hin, dass diese markante Hirnstruktur bei den unterschiedlichsten Vorgängen mitwirkt.

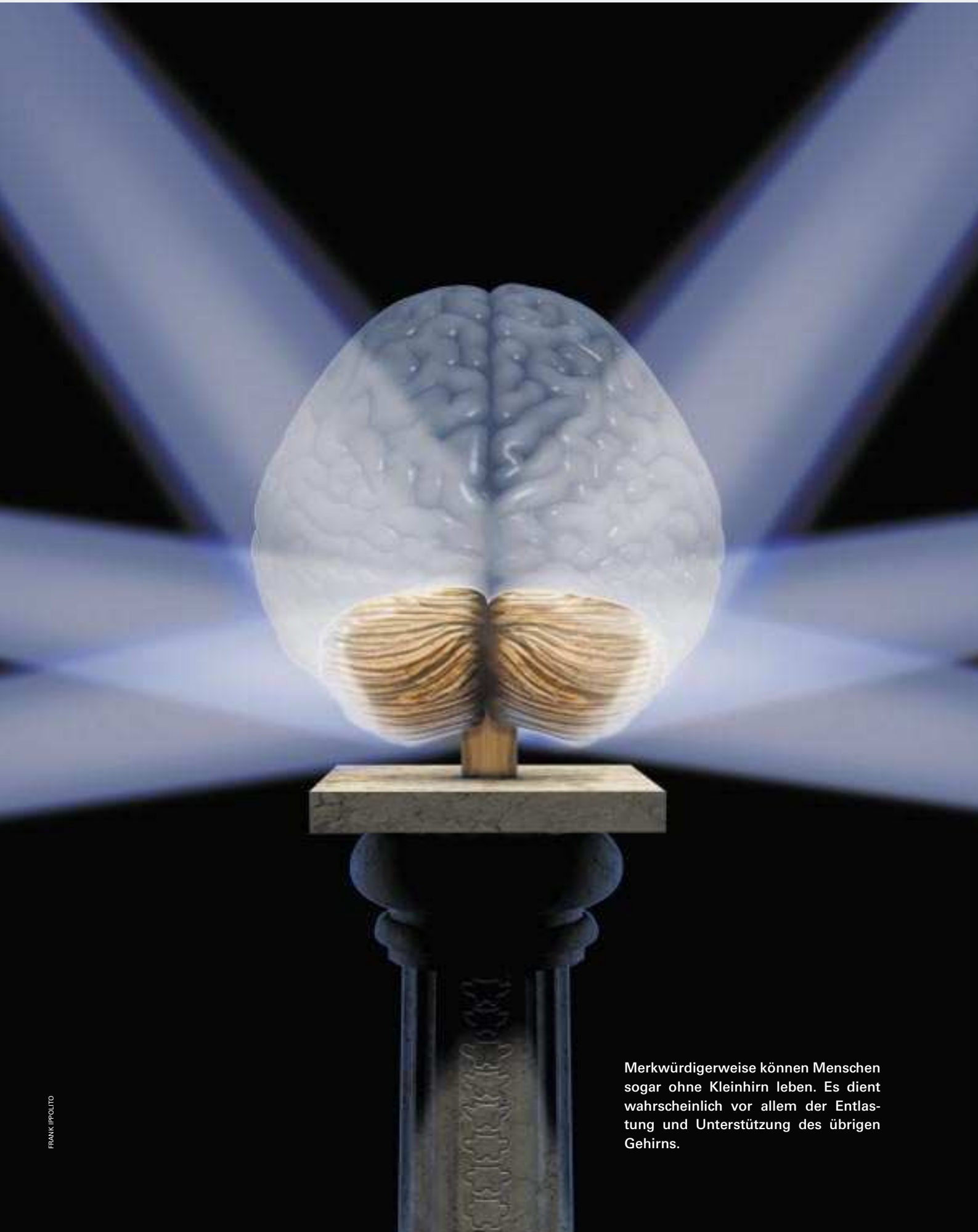
Insbesondere haben die modernen, nichtinvasiven bildgebenden Verfahren erwiesen, dass unser Kleinhirn bei vielerlei Anforderungen Aktivität zeigt, die mit Muskelbewegungen – also mit Motorik – zumindest direkt nichts zu tun haben. Das reicht von der Gefühlsebene bis hin zu höheren geistigen Prozessen. Zu diesen Befunden passen unerwartete Fehlleistungen bei Schädigung spezifischer Kleinhirnregionen. Ausgeklügelte Studien dazu enthüllten, dass die Betroffenen Sinneseindrücke langsamer und ungenauer erfassen.

Außerdem scheint das Kleinhirn für das so genannte Kurzzeitgedächtnis wichtig zu sein, das die momentanen Eindrücke ein paar Minuten lang präsent hält. Das Cerebellum dürfte auch teilnehmen, wenn Aufmerksamkeit beziehungsweise eine Kontrolle impulsiven Verhaltens gefragt ist, oder wenn Handlungen geplant und durchgeführt werden. Manche Forscher vermuten sogar, dass bei Phänomenen wie Schizophrenie, Autismus, Legasthenie und Hyperaktivität Störungen in diesem Hirnteil eine Rolle spielen.

Dass das Kleinhirn nicht einfach eine Kontrollstelle für die Organisation von Bewegungen darstellt, zeigten auch Ergebnisse von neurobiologischen Experimenten zur Aktivität des Cerebellums bei Sinneseindrücken. ▷

IN KÜRZE

- Das **Kleinhirn (Cerebellum)** an der Gehirnbasis zeichnet sich durch eine sehr **strenge Architektur** seiner komplexen Nervenschaltkreise aus. Derselbe äußerst regelmäßige Aufbau findet sich schon bei den frühen Wirbeltieren.
- Nach **früheren Theorien** kontrolliert das Kleinhirn Bewegungen. Neuere Studien beweisen hingegen seine Beteiligung an vielfältigen anderen Vorgängen. Vielleicht befasst es sich weniger mit Bewegungskoordination als mit der **Koordination von Sinnesinformationen**.
- Ein **kompletter Verlust** des Kleinhirns in frühem Alter bedeutet langfristig oft wenig Verhaltensdefekte. Offenbar kann das übrige Gehirn lernen, auch ohne Kleinhirn zurechtzukommen.



FRANK IPPOLITO

Merkwürdigerweise können Menschen sogar ohne Kleinhirn leben. Es dient wahrscheinlich vor allem der Entlastung und Unterstützung des übrigen Gehirns.

Bedenkt man die beträchtliche Größe des Kleinhirns und seinen ziemlich komplizierten Aufbau, mag es im Nachhinein nicht verwundern, dass es mehr kann als Bewegungen kontrollieren. An Volumen wird es nur von der Großhirnrinde übertroffen. Auch gewinnt es wie das menschliche Großhirn durch starke Faltung viel Oberfläche. Dadurch findet auf relativ wenig Raum eine beträchtliche Anzahl von untereinander verschalteten Nervenzellen Platz. Beim Menschen ist die Kleinhirnrinde sogar viel stärker gefaltet als die Großhirnrinde. Bei vielen Säugetieren stellt sie zudem die einzige gefaltete Hirnrinde dar. Ausgebreitet hat unser Cerebellum eine Fläche von durchschnittlich 1128 Quadratzentimetern, etwas mehr als das Cover einer Langspielplatte. Beide Großhirnhemisphären des Menschen zusammen würden rund 1900 Quadratzentimeter bedecken, weniger als das Doppelte der Kleinhirnoberfläche.

Die Bedeutung des Kleinhirns zeigt sich ebenfalls darin, dass es im Verlauf der Evolution, von den ersten Fischen vor über 400 Millionen Jahren an, nicht nur erhalten blieb, sondern auch größer wurde. Fossile Schädel lassen während der Menschwerdung mindestens drei Wachstumsschübe erkennen.

Das Bemerkenswerteste am Kleinhirn dürfte aber die riesige Zahl seiner Neuronen sein. Unser Cerebellum enthält mehr Nervenzellen als das gesamte übrige Gehirn. Trotzdem haben sich die strengen, auffallend regelmäßigen Verschaltungsmuster seiner Neuronen während über 400 Millionen Jahren Wirbeltierevolution kaum verändert. Die Nervenzellen in unserem Kleinhirn sind noch nach dem gleichen Schema geordnet und miteinander verknüpft wie bei den urtümlichen Haien (siehe Kasten rechts).

Bewegungsstörungen und Sprachschwierigkeiten

Die These, das Kleinhirn kontrolliere die Motorik, kam Mitte des 19. Jahrhunderts auf. Damals bemerkten Mediziner, dass es Patienten nach Entfernung dieses Gehirnteils schwer fiel, Bewegungen zu koordinieren. Viele Erkenntnisse hierzu sammelte dann der englische Neurologe Gordon Holmes während des Ersten Weltkriegs an verwundeten Soldaten mit Gehirnschüssen.

Erst in den letzten 15 Jahren begann sich abzuzeichnen, dass die Bedeutung des Kleinhirns weiter reicht als bisher angenommen. Verfeinerte Untersuchungsverfahren enthüllten eine Beteiligung an unerwartet vielen scheinbar ganz unterschiedlichen Vorgängen. So erkannten Richard B. Ivry und Steven W. Keele von der Universität von Oregon in Eugene 1989, dass Menschen mit einer Kleinhirnverletzung weder die Dauer eines vorgespielten Tones noch die Länge einer Pause zwischen zwei Tönen korrekt zu schätzen vermögen.

Anfang der 1990er Jahre beschrieb ein Team um Julie A. Fiez von der Washington University in Saint Louis (Missouri), dass Kleinhirnpatienten bei sprachlichen Aufgaben, die Verben betreffen, eher Fehler machten. Sie brauchten auffallend lange, um etwa zum Bild eines Rasierapparats das passende Tätigkeitswort zu nennen. Viel schneller kamen sie auf ein passendes Adjektiv. Wie wir selbst nachwiesen, fällt es Menschen mit neurodegenerativen Erkrankungen, bei denen das Kleinhirn schrumpft, ungewöhnlich schwer, zwei etwas unterschiedlich hohe Töne zu unterscheiden.

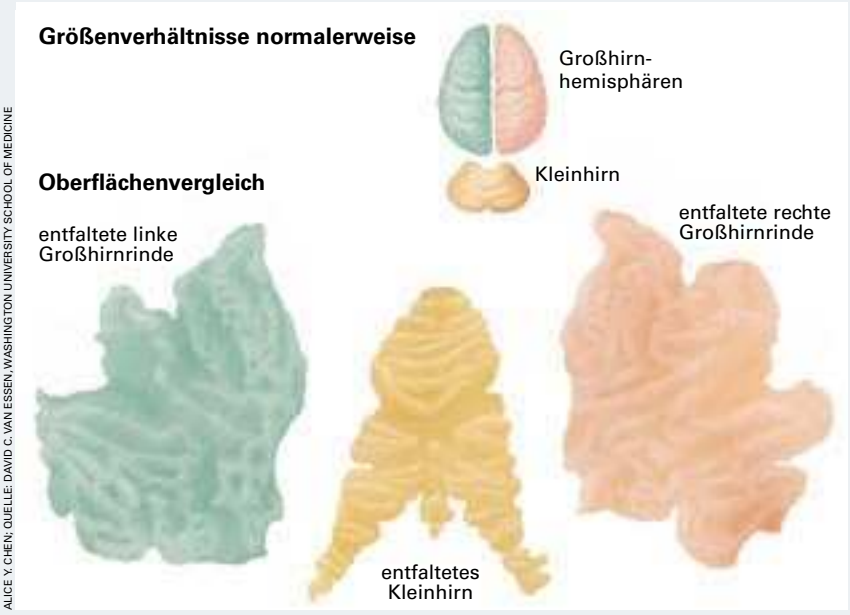
Hans-Peter Thier und sein Team von der Universität Tübingen stellten fest, dass Menschen mit ganz oder teilweise geschädigtem oder geschrumpftem Kleinhirn leicht Fehler machen, wenn sie angeben sollen, ob ein sich bewegendes Bild auftaucht, wie schnell es sich bewegt oder in welche Richtung es wandert. Hermann Ackermann von derselben Universität und seine Mitarbeiter prüften das Unterscheidungsvermögen für ähnlich klingende Wörter, bei denen nur ein Konsonant ausgetauscht war. Patienten mit degeneriertem Kleinhirn vermochten etwa die Klangfolgen »Boden« und »Boten« nicht auseinander zu halten, die sich physikalisch nur durch die Pausenlänge nach dem »O« unterscheiden.

Doch beschränken sich Fehlleistungen bei Kleinhirndefekten wohl nicht auf die Sinneswahrnehmung und sprachliche Fertigkeiten. Nach Jeremy D. Schmahmann vom Massachusetts General Hospital in Boston können betroffene Erwachsene und auch Kinder ihre Gefühle schlecht angemessen dosieren. Was andere geringfügig aufbringen würde, löst bei ihnen entweder gar keine oder viel zu heftige Emotionen aus. Weiteren Studien zufolge schränken Schädigungen des Cerebellums die räumliche ▷

Nur gefaltet klein

Die große Oberfläche des Cerebellums

Obwohl das Kleinhirn viel weniger Raum einnimmt als eine Großhirnhälfte, enthält es mehr Nervenzellen als das gesamte übrige Gehirn. Flach ausgebreitet wäre es etwas größer als eine entfaltete Hemisphäre der Großhirnrinde.



ALICE Y. CHEN; QUELLE: DAVID C. VAN ESSEN, WASHINGTON UNIVERSITY SCHOOL OF MEDICINE

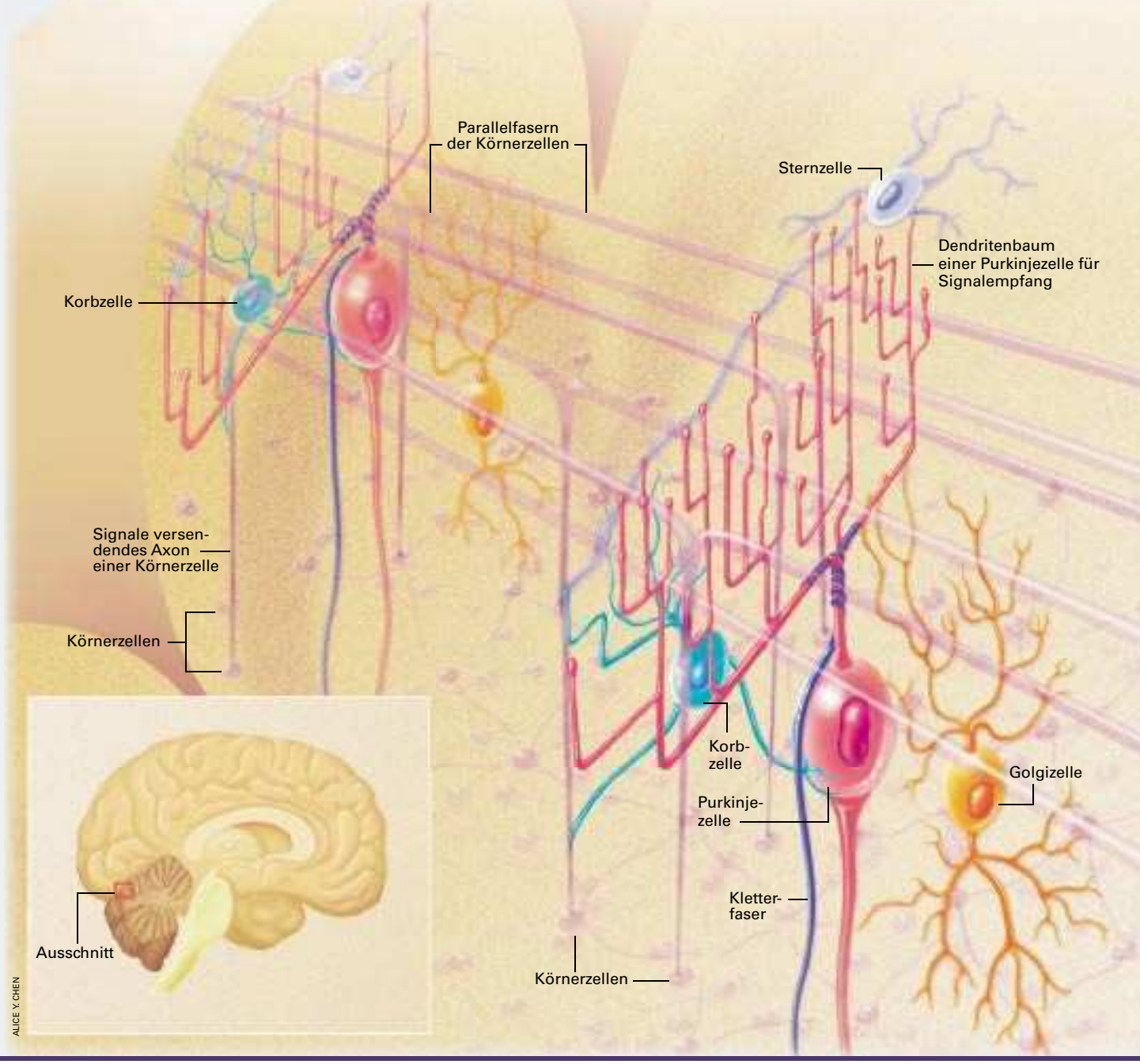
Strenge neuronale Architektur

Grundzüge der Nervenverschaltung im Kleinhirn enthüllte schon im 19. Jahrhundert der spanische Neuroanatom Santiago Ramón y Cajal (1852 – 1934). Bereits 1837 hatte der böhmische Physiologe Johannes E. Purkinje (1787 – 1869) die nach ihm benannten Purkinjezellen entdeckt. Sie gehören zu den größten Neuronen des Nervensystems und senden als einzige Nervenzellen Signale aus der Kleinhirnrinde aus.

Eine Purkinjezelle trägt 150 000 bis 200 000 Synapsen, über die sie von anderen Neuronen Input erhält – eine Größenordnung mehr als die bestbestückten Zellen der Großhirnrinde. Die Information liefern ihnen vor allem die äußerst zahlreichen Körnerzellen. Diese gehören zu den kleinsten Nervenzellen von Wirbeltieren. Mit 6 Millionen pro Quadratmillimeter ist das der häufigste Neuronentyp des Gehirns.

Er bildet in der Kleinhirnrinde eine eigene Schicht, aus der jede Körnerzelle einen Signale versendenden Arm (ein Axon) nach oben schickt. Über diesen kontaktiert eine Körnerzelle die über ihr liegende Purkinjezelle. Dann gabelt sich der Arm in zwei Äste, die in entgegengesetzte Richtungen abzweigen. Mit vielen anderen solchen Ästen bilden die Äste die Parallelfasern, welche durch die signalempfangenden Ausläufer (Dendritenbüsche) Hunderter von Purkinjezellen ziehen.

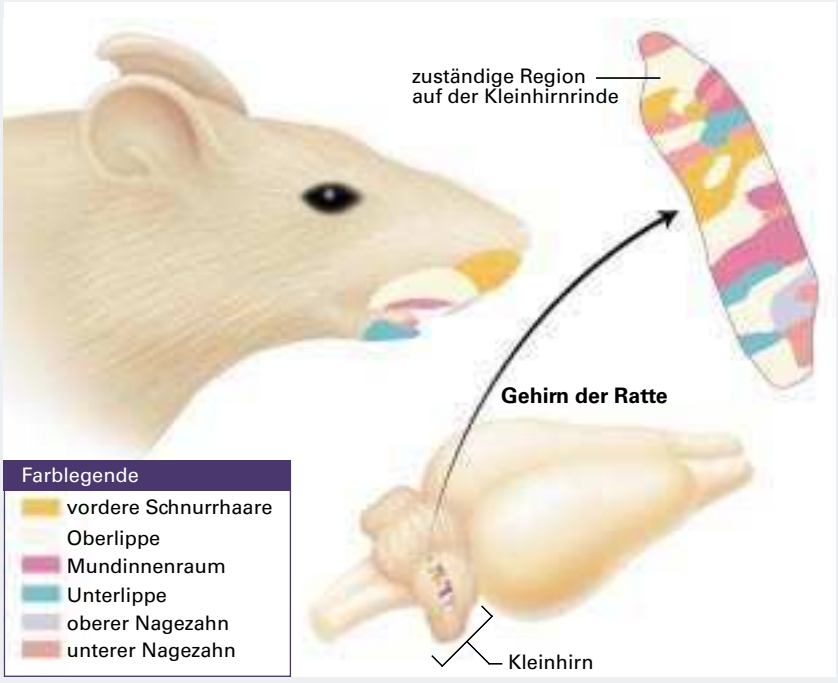
Weitere Zelltypen modulieren die von den Körner- und Purkinjezellen übermittelten und weitergegebenen Signale.



Komplexe Tomografie

Bei Affen die Hände, bei Ratten die Schnauze

Einzelne Zonen der Rattenschnauze aktivieren bei einem Berührungsreiz nicht etwa ein einziges Areal des Kleinhirns, sondern gleich mehrere. Dank dessen kann das Kleinhirn vielleicht eine Flut von Informationen von verschiedenen Körperflecken integrieren, wenn das Tier mit seiner Schnauze etwas erkundet.



▷ Wahrnehmung ein. Die Patienten brauchen zum Beispiel länger, um zu erkennen, ob zwei Bilder das gleiche Objekt aus verschiedenen Blickwinkeln zeigen. Sie irren sich dabei auch öfter.

Einige Wissenschaftler sehen sogar einen Zusammenhang mit Legasthenie. Wie etwa Rod I. Nicolson und seine Kollegen von der Universität Sheffield (Großbritannien) erkannten, ähneln sich die Lernbehinderung bei einer Lese- und Schreibschwäche und die bei geschädigtem Kleinhirn. Dieselben Forscher zeigten auf, dass das Cerebellum von Legasthenikern während bestimmter Aufgaben ungewöhnlich schwach aktiviert ist.

Weitere neuere Forschungen lassen eine Beteiligung des Kleinhirns am so genannten Arbeitsgedächtnis vermuten, das in einer aktuellen Situation Informationen und Handlungsstrategien bereithält. Auch bei Aufmerksamkeit, dem Fassen eines Plans und der Impulskontrolle scheint dieser Hirnteil mitzuwirken. So beobachteten 1992 Jordan Grafman und seine Mitarbeiter von den National Institutes of Health in Bethesda in Maryland, dass Menschen mit atrophiertem (geschrumpftem) Cerebellum das klassische Knobelspiel »Der Turm von Hanoi« nicht bewältigten. Bei dieser Denksportaufgabe müssen Ringe verschiedener Durchmesser nach bestimmten Regeln und in bestimmter Reihenfolge der Größe nach auf Stäben gestapelt werden.

Katzenpfoten und Kinderfinger

Bei einfachen Denkaufgaben mit gesunden Versuchspersonen konnten Forscher 1997 in zwei voneinander unabhängigen Studien mit moderner Bildgebung die Kleinhirnaktivität aufzeichnen. Im einen Fall mussten die Teilnehmer eine zuvor gehörte Buchstabenreihe memorieren. Im anderen sollten sie für ein bestimmtes Bild ein passendes Muster suchen.

Dass hyperaktive Kinder ein ziemlich kleines Cerebellum haben, stellten 2002 Xavier Castellanos, Judith L. Rapoport und ihr Team vom National Institute of Mental Health in Bethesda ebenfalls mit bildgebenden Verfahren fest. Kindern mit dieser Verhaltensauffälligkeit fehlt vornehmlich die Impulskontrolle (siehe auch Spektrum der Wissenschaft 3/1999, S. 30). Und nicht zuletzt erwiesen Gehirnaufnahmen von gesunden Personen sowie auch von Tieren, dass das Kleinhirn bei verschiedensten Wahrnehmungen und Empfindungen aktiv ist, so beim Hören und Riechen, bei Schmerz, Hunger oder Durst, auch bei Atemnot und bei bewussten Körperbewegungen.

Mit etlichen unserer Kollegen teilen wir die Ansicht, dass die traditionelle Sicht vom Kleinhirn als Kontrollstelle für Motorik, also für Bewegungen, den neuen Ergebnissen nicht gerecht wird. Das schlossen wir selbst zunächst aus eigenen Forschungen an Ratten über Kleinhirnregionen, die bei Berührung bestimmter Körperstellen – also bei Sensorik – aktiv werden.

Einer von uns (Bower) begann mit solchen Untersuchungen schon vor über zwanzig Jahren an der Universität von Wisconsin in Madison als Student von Wallace I. Welker. An Gehirnen der Nager kartierte er die elektrische Aktivität von kleinen Neuronen-Feldern bei leichter Berührung verschiedener Körperteile.

Die taktile Stimulation löste in einem großen Gebiet des Kleinhirns neuronale Aktivität aus (siehe Kasten links). Aber nicht nur das – heraus kam dabei eine gewissermaßen buntscheckige, recht wirr erscheinende Karte. Aneinander stoßende Flecken der Kleinhirnrinde erhalten ihren Input oft von nicht benachbarten Körpergebieten. Umgekehrt finden sich Inputs aus demselben Bereich der Körperoberfläche oft zerstückelt in auseinander liegenden Arealen. In der Großhirnrinde ist das völlig anders. Dort spiegeln sich die räumlichen Beziehungen der Körperoberfläche in der Anordnung der Hirnareale.

Noch erstaunlicher war, dass die taktile Region des Rattenkleinhirns hauptsächlich auf Berührungsreize im Gesicht anspricht. Denn bei früheren Untersuchungen von Ray S. Snider von der Northwestern University war herausgekommen, dass im Katzenkleinhirn der größte Teil des entsprechenden Gebiets bei Berührung der Vorderpfoten reagiert. Bei Affen sind es vor allem die Finger.

Welchen Sinn konnte das haben? Verarbeitet das Kleinhirn jeweils vorwiegend Sinnesempfindungen des Körperteils, mit dem ein Tier bevorzugt die

Welt erkundet? Genauer gesagt wäre es in dem Fall der Teil, mit dem sie die Dinge berühren und so Erfahrungen sammeln. Katzen richten bekanntlich mit ihren neugierigen Pfoten und Krallen manches Unheil an. Auch bei Kindern muss man unaufhörlich auf der Hut sein, damit die eifrigen kleinen Finger nicht zu viel kaputt machen und vor allem selbst heil bleiben. Ratten hingegen benutzen zur Erkundung bevorzugt Schnauze und Nagezähne.

Beim Wahrnehmen mithelfen

Angesichts der räumlich zerstückelten Wiedergabe im Kleinhirn erscheint gut möglich, dass dessen Region für taktile Reize dazu dient, an verschiedenen Flecken der Körperoberfläche gewonnene sensorische Daten miteinander zu vergleichen. Offenbar sind diese Gehirnkarten je nach Tierart so organisiert, wie die betreffenden Körperpartien beim Erkunden der Umwelt benutzt werden.

Daraus entwickelte Modelle und weitere Experimente mit Ratten bestärkten die These, dass das Kleinhirn dieser Nager sensorische Informationen von verschiedenen Feldern im Bereich der Schnauze vergleicht. So entstand eine neue Hypothese zur Funktion des Kleinhirns: Ihr zufolge hätte das Cerebellum vor allem die Aufgabe, beim Erwerb oder Erfassen sensorischer Daten koordinierend mitzuwirken.

Neue Hypothesen zu Hirnfunktionen vorzuschlagen ist einfach im Vergleich damit, sie in der Wissenschaft durchzusetzen – umso mehr, wenn diese vor 150 Jahren beschloss, dass das Kleinhirn der Motorik dient, und die neue Idee dazu konträr steht. Hinzu kommt, dass im Gehirn die Systeme für Sensorik und Motorik sehr eng verzahnt sind, ganz besonders beim Tastsinn. Es galt zu beweisen, dass die beobachtete Kleinhirnaktivität tatsächlich ein sensorisches Phänomen ist, kein motorisches. Allenfalls könnte das mit menschlichen Studienobjekten gelingen, die sich im Experiment nur dann bewegen, wenn sie es sollen. Hier begann unser beider Zusammenarbeit.

Gemeinsam mit Peter T. Fox von der Universität von Texas in San Antonio entwarfen wir entsprechende Versuche. In einem der Experimente sollten die Teilnehmer kleine Objekte entweder nur aufheben und wieder fallen lassen oder aber sie sollten die Objekte durch reines Fühlen mit den Fingern unterscheiden. Währenddessen zeichneten wir die Aktivität des Kleinhirns auf.

Die verschiedenen Bällchen anzufassen, ein wenig hochzuheben und wieder loszulassen beansprucht die Feinmotorik von Fingern und Händen. Nach sämtlichen alten Kleinhirn-Theorien hätte dabei in den fraglichen Arealen eine deutlich erhöhte neuronale Aktivität auftreten müssen. Das war aber nicht der Fall. Eine starke Reaktion in diesem Gebiet des Cerebellums beobachteten wir nur dann, wenn die Teilnehmer die Objekte durch Fühlen auseinander zu halten versuchten (siehe Kasten nächste Seite). Dieses Ergebnis werten wir als weiteren Hinweis darauf, dass das Kleinhirn sich tatsächlich mehr mit Sensorik als mit reiner Motorik befasst und insbesondere hochaktiv ist, wenn es gilt, sensorische Daten aufzunehmen.

Als die neuen Beobachtungen immer offensichtlicher machten, dass die bisherigen Kleinhirn-Theorien nicht genügen, haben etliche Forschergruppen neue Modelle aufgestellt. Unseres ist nur eines davon. Vielfach haben die Wissenschaftler die alten Theorien über eine Beteiligung an motorischen Prozessen schlicht erweitert und an die neuen Daten angepasst. Richard Ivry beispielsweise – einer der Entdecker des mangelhaften Zeitempfindens von Kleinhirnpatienten, der jetzt an der Universität von Kalifornien in Berkeley arbeitet – glaubt, dass sich das Cerebellum mit zeitlicher Koordination befasst. So wie es die zeitliche Abstimmung von Muskelbewegungen – ▷

Funktionsausfälle

Leben mit defektem Kleinhirn

Rudolf van't Hoff leidet an einer seltenen Erbkrankheit, bei der das Kleinhirn degeneriert. Weil sich der amerikanische Farmer auf sein Gleichgewichtsempfinden und seine Bewegungskoordination nicht mehr verlassen kann, bindet er sich auf dem Traktor mit einem Gummiseil fest. Schwierigkeiten bereiten ihm auch die Unterscheidung mancher Laute und das Sprechen.

CHRIS HARTLOVE

Greifen oder tasten?

Wann meldet sich das Kleinhirn?

Wäre das Kleinhirn vorrangig für die Kontrolle der Motorik, also für Bewegungen zuständig, müsste es bei reiner Muskeltätigkeit aktiv sein. Falls es eher der sensorischen Koordination dient, würde es beim Tasten anspringen. Um beides auseinander zu halten, haben wir die hier vorgestellten Versuche konzipiert. Die Aktivität des Kleinhirns erfassten wir dabei mittels Magnetresonanztomografie.

Im ersten Versuch (oben) prüften wir die rein sensorische Reaktion auf verschieden grobes Sandpapier. Hände und Finger der sechs Teilnehmer waren dabei fixiert, und wir strichen mit dem Sandpapier leicht über ihre Fingerkuppen. Dabei maßen wir eine schwache Kleinhirnaktivität (a). Sie wurde stärker, wenn wir die Leute baten, auf die Körnigkeit von zwei Papiersorten zu achten, die sie rechts und links fühlten (b).

Der zweite Versuch (unten) war entscheidend. Die Hände der Teilnehmer steckten in Säckchen, in denen sie kleine Holzkugeln mit verschiedenen Formen und Oberflächenstrukturen fühlten. Zunächst sollten die Probanden nur einzelne Bällchen aufnehmen und wieder loslassen (c). Dann baten wir sie, jedes Mal Oberfläche und Form der beiden gegriffenen Objekte zu vergleichen. (d).

Beim reinen Anfassen und Loslassen der Kugeln, wobei hauptsächlich die Motorik gefragt war, blieb das Kleinhirn so gut wie stumm. Doch beim Bewerten der beiden gefühlten Objekte sprach es deutlich an. Dieses Ergebnis passt zu anderen, die als Hauptaufgabe des Kleinhirns eine koordinierende Funktion für Sinnesempfindungen vermuten lassen.

a) passives Fühlen ohne Bewegung

b) das Gefühlte aktiv vergleichen ohne Bewegung

c) passives Fühlen mit Bewegung

d) das Gefühlte aktiv vergleichen mit Bewegung

GRAFIKEN: MATT COLLINS; GEHIRNSCANS: NACHDRUCK AUS SCIENCE, BD. 272, 26. APRIL 1996, JIA-HONG GAO ET AL.

▷ etwa für die Stellung der Gliedmaßen – kontrolliere, ermögliche es ebenso die Zeitempfindung für Sinneseindrücke, auch für Gehörtes und Gesehenes.

Nach Meinung anderer Forscher verhilft das Kleinhirn nicht nur zu glatten Bewegungsabläufen, sondern es macht auch die Informationsverarbeitung im Zusammenhang mit Stimmungen und Gedanken »geschmeidiger«. Das postulierte Jeremy Schmahmann schon 1991. Fünf Jahre später übernahm Nancy C. Andreason von der University of Iowa in Iowa City diese Hypothese für Schizophrenie: Die für diese Krankheit charakteristischen Störungen könnten ursprünglich auf Kleinhirn-Defizite zurückgehen. Manche Wissenschaftler glauben nämlich, die drastische Vergrößerung mancher Kleinhirnregionen in der menschlichen Evolution gehe mit einer Entlastung der Großhirnrinde einher. Bei hoher psychischer Beanspruchung könne diese einen Teil der Vorgänge auslagern und sozusagen beim Kleinhirn Rechenkapazität belegen.

Die Zahl der Funktionen, die Forscher dem Kleinhirn zuschreiben, wuchs, je mehr Umstände sie fanden, unter denen das Kleinhirn aktiviert wird. Noch haben sie allerdings nicht geklärt, wie das Cerebellum mit seiner geradezu eintönigen neuronalen Architektur all das leisten soll (siehe auch das neuronale Funktionsmodell in Spektrum der Wissenschaft 10/2001, S. 36).

Assistent des übrigen Gehirns

Äußerst verblüffend ist, dass sich Menschen von einer Kleinhirnverletzung wieder erholen können. Wenn das Cerebellum komplett entfernt werden musste, misslingen den Patienten koordinierte Bewegungsabläufe zunächst. Doch mit der Zeit können einige Betroffene wieder eine beachtliche, weitgehend normal wirkende Bewegungskompetenz erlangen, besonders Kinder. Zwar ist Plastizität generell eine Gehirneigenschaft, und auch Schäden anderer Regionen werden mehr oder weniger kompensiert. Doch bei einem Defekt ähnlichen Ausmaßes in den primären sensorischen oder motorischen Arealen der Großhirnrinde bleiben manche Funktionen für immer verloren, beim Menschen wie bei Tieren.

Ist das Kleinhirn demnach eigentlich überflüssig? Unter Hirnforschern kursiert der Scherz, es würde nur seine eigene Bedeutungslosigkeit kaschieren. Tatsächlich wäre das bei einer so großen und diffizilen Struktur höchst unwahrscheinlich. Auch hat das Cerebellum sicherlich mehr als rudimentäre Aufgaben. Was immer diese Funktionen sein mögen – sie müssen derart aussehen, dass das restliche Gehirn sie notfalls in beträchtlichem Umfang zu kompensieren vermag.

Nur wenige der Theorien bieten für dieses Paradox eine Erklärung an. Aus unserer Sicht spricht das Phänomen dafür, dass das Cerebellum das übrige Gehirn zwar allgemein, aber dennoch eher subtil unterstützt. Gemäß unserer Hypothese der sensorischen Koordination wäre es also nicht für irgendein spezielles Verhalten oder einen bestimmten psychischen Vorgang zuständig, sondern leistete generell Assistenz. Zu seinen Hilfsdiensten gehört demnach, einlaufende Sinnesdaten zu überwachen. Dabei wirkt es fortlaufend auf eine Feinjustierung der Datengewinnung hin, sodass das Individuum stets die höchstmögliche Qualität an Information erzielt.

Nach unserer Voraussage handelt es sich bei solcher Feinabstimmung um feinste Veränderungen etwa der Fingerposition der tastenden Hand oder der Schnurrhaare einer erkundenden Ratte wie auch um winzigste Anpassungen von Auge oder Ohr, um so genau wie möglich zu sehen oder zu hören.

Dass das Kleinhirn auf so viele Situationen mehr oder weniger stark anspricht, könnte man bei der postulierten weit reichenden Unterstützungsfunktion durchaus erwarten, und zwar besonders für die sorgfältige Kontrolle von sensorischem Input, vielleicht aber auch für die von sensorischen Erinnerungen. Zu einer solchen Rolle würde auch passen, dass andere Gehirnteile bei einem Ausfall oft einspringen und die Information nun in ihrer Weise verarbeiten.

Aufschlussreich ist in dieser Hinsicht, dass Kleinhirn-Geschädigte Bewegungen offenbar langsamer ausführen und auch vereinfachen. Solches kompensierende Verhalten erscheint plausibel, wenn hochgenaue Sinnesdaten nicht verfügbar sind. Spinnt man diesen Gedanken weiter, müsste es auf Dauer mehr Schwierigkeiten bereiten, mit einem zwar tätigen, aber defekten Kleinhirn zu leben als ohne diesen Hirnteil. Fällt er ganz aus, vermögen andere Strukturen die fehlenden Funktionen offenbar mit der Zeit auszugleichen. Doch wenn das Kleinhirn den sensorischen Input ungenau kontrolliert und deswegen immerfort fehlerhafte Daten liefert, könnte es sein, dass dies anhaltende Funktionsstörungen anderer Hirnregionen nach sich zieht. Möglicherweise bestehen ähnliche Zusammenhänge unter anderem bei Autismus. Autisten können mit Sinneseindrücken nicht angemessen umgehen. Seit kurzem vermuten Experten, dass das Kleinhirn hierbei involviert ist.

Suche nach neuer Gehirn-Theorie

Auch dass die Rolle des Kleinhirns so schwer fassbar ist, wäre eher erklärlich, wenn es nur indirekt mitarbeitete. Aktivität einer Hirnregion bei bestimmten Ereignissen muss nicht heißen, dass diese Region über die jeweiligen Verhaltensäußerungen oder psychischen Vorgänge bestimmt. Dieser wichtige Zusammenhang sei an einem Beispiel aus der Technik veranschaulicht: Die meisten Teile unter der Motorhaube eines Autos dienen zur Unterstützung des Motors. Am Kühler etwa ließe sich vieles zur augenblicklichen Fahrt ablesen, obwohl letztlich der Motor die treibende Kraft darstellt.

Auf unser Modell übertragen hieße dies: Das Kleinhirn würde bei den zahlreichen ihm jetzt zugeschriebenen Aufgaben eher aus dem Hintergrund mitwirken. Ob diese Vorstellung oder eine der anderen neuen Kleinhirn-Theorien letztlich zutreffen, ist noch offen. Mit Sicherheit wissen die Hirnforscher nur, dass die früheren Konzepte nicht mehr passen. Das Kleinhirn neu zu interpretieren bedeutet zugleich, das gesamte Gehirn mit anderen Augen zu sehen. ◁

James M. Bower und **Lawrence M. Parsons** arbeiten an der Universität von Texas in San Antonio. Am dortigen Zentrum für Gesundheitswissenschaften hat Bower eine Professur für Neuroinformatik, Parsons eine für kognitive Neurowissenschaften. Bower ist zugleich Professor am Cajal-Zentrum für Neurowissenschaft in San Antonio.

Das unterschätzte Kleinhirn. Von Detlef Heck und Fahad Sultan in: Spektrum der Wissenschaft, 10/2001, S. 36.

The Cerebellum: Recent Developments in Cerebellar Research. Von S. M. Highstein und W. T. Thatch (Hg.). New York Academy of Sciences, 2002.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

MENLOSYSTEMS

Ein Lineal aus Licht

Von Roland Wengenmayr

Wie misst man die Frequenz sichtbaren Lichts? Während es vergleichsweise einfach ist, dessen Wellenlänge zu bestimmen (siehe Kasten auf der rechten Seite), haben sich Experimentalphysiker an seiner enormen Schwingungszahl mit mäßigem Erfolg versucht, bis Theodor Hänsch und seine Mitarbeiter Thomas Udem und Ronald Holzwarth 1998 am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching einen kompakten Lichtzähler erfanden – den »Frequenzkamm«. Sein Vorteil: Während sich die Wellenlänge von Licht mit den gängigen Methoden nur auf Eins zu Zehnmilliarden genau messen lässt, ist die Präzision des Frequenzkamms um fünf Größenordnungen besser. Diese enorme Genauigkeit nutzt nicht nur der Grundlagenforschung – der Frequenzkamm ermöglicht die Konstruktion hochpräziser Atomuhren, wie sie etwa in der Satellitennavigation benötigt werden.

Das patentierte Verfahren vermarktet die Firma MenloSystems in Martinsried bei München. (Der Firmenname nimmt Bezug auf den Menlo Park in New Jersey, wo Thomas Alva Edison 1876 seine Invention Factory aufbaute.) Zu den Firmengründern gehören Hänsch und Holzwarth, der für die Weiterentwicklung der Geräte zuständig ist. Das Unternehmen fertigt die Messinstrumente und verkauft sie für rund eine Viertelmillion Euro pro Stück in alle Welt.

Ein Getriebe für Licht

Hänsch und seine Mitarbeiter hatten ein gravierendes Problem zu lösen: Das elektromagnetische Feld sichtbaren Lichts schwingt mit einer Frequenz von fast 10^{15} Hertz (Schwingungen pro Sekunde). Keine Elektronik dieser Welt wäre schnell genug, dies zu zählen (beispielsweise anhand der Nulldurchgänge des elektrischen Anteils). Laserphysiker hatten bereits seit dreißig Jahren versucht, optische »Getriebe« zu entwickeln: Wie bei einer Fahrradschaltung sollten sie sozusagen die »Umdrehungszahl« eines zu vermessenden Laserstrahls in die niederen Frequenzen von Radiowellen untersetzen. Die so einfach klingende Idee mündete aber stets in riesige und wenig brauchbare Anlagen.

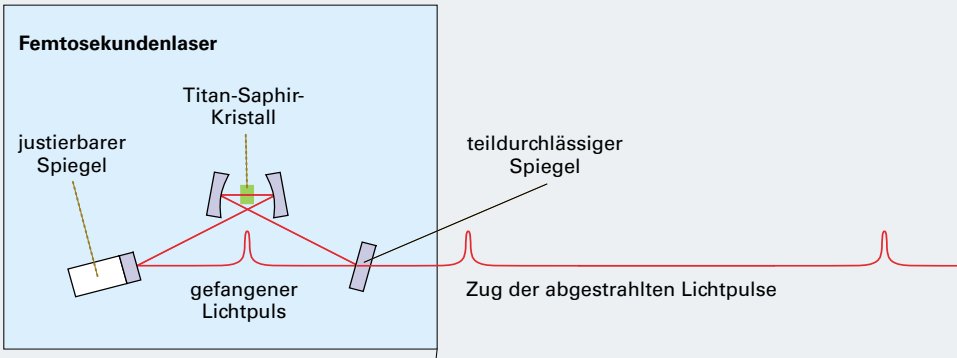
Der »Frequenzkamm« füllt derzeit noch einen halben Labortisch, die nächste Gerätegeneration soll in einen Schuhkarton passen. Herzstück des Getriebes ist ein Titan-Saphir-Laser. Er liefert Licht sehr genau bekannter Frequenzen, das mit dem zu vermessenden Strahl interferiert. Musiker kennen das Phänomen: Zwei Töne fast gleicher Schwingungszahl erzeugen bei der Überlagerung eine Schwebung – eine Oszillation, die deutlich langsamer ist als die beiden ursprünglichen; hier liegt sie im Bereich von Radiofrequenzen. Deren Schwingungszahl lässt sich leicht messen und die der unbekannten Frequenz dann sehr genau berechnen.

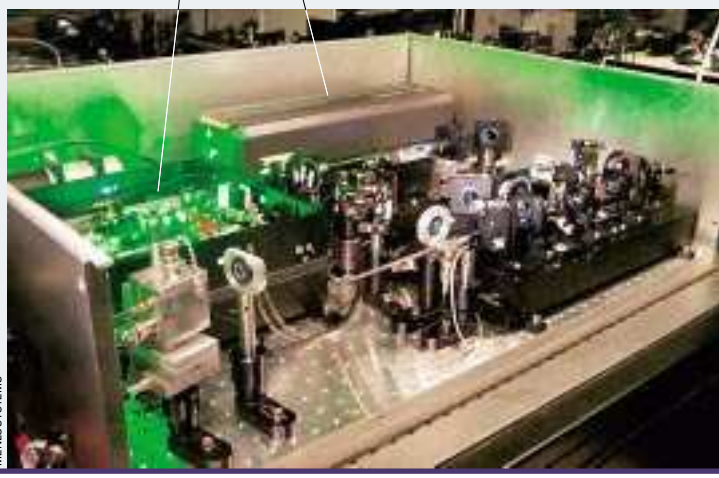
Kurzer Puls, breites Spektrum

Bisherige Systeme lieferten nur eine einzige Referenzfarbe, der Frequenzkamm eine ganze Skala. Jeder Laser besteht unter anderem aus einem optischen Resonator, in dem sein Licht zwischen Spiegeln wieder und wieder reflektiert wird, dabei sich immer mehr verstärkt und schließlich durch einen teildurchlässigen

Lichtpulse in der Umlaufbahn

Der Frequenzkamm leuchtet im grünen Licht eines Pumplasers, wie er für den Betrieb jedes Femtosekundenlasers erforderlich ist. Dessen Herzstück ist ein optischer Resonator aus Spiegeln (blau), in dem ein Lichtpuls (rot) umläuft. Einer der Spiegel ist justierbar und bestimmt die Weglänge. Bei jedem Umlauf tritt ein Puls aus, der eine feste Phasenbeziehung zu Pulsen im Resonator hat.





MPI FÜR QUANTENOPTIK

MENLOSYSTEMS

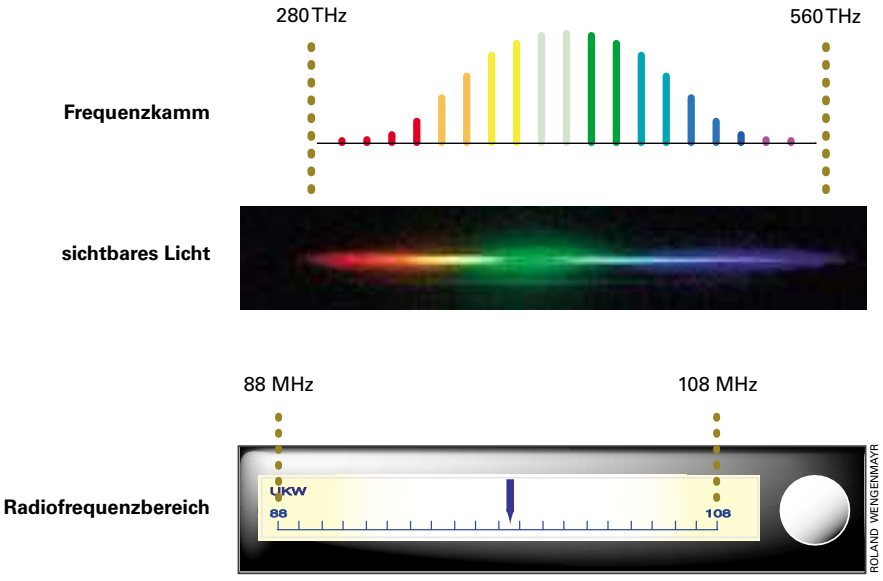
Spiegel als monochromatischer Strahl austritt. Beim Frequenzkamm springt ein extrem kurzer Lichtpuls wie ein Ping-Pong-Ball hin und her. Das hat den Vorteil, dass ein Puls nicht aus einer einzigen Farbe besteht, sondern aus einem ganzen Spektrum von Frequenzen (in gleicher Weise regt ein Knall oder Händeklatschen nicht nur eine, sondern eine Vielzahl von Saiten zum Mitschwingen an). Jeder Lichtpuls, der den Laser verlässt, blitzt nur einige Femtosekunden lang auf, also für den millionsten Bruchteil einer milliardstel Sekunde. Es gilt aber die Regel: Je kürzer der Puls, desto breitbandiger sein Spektrum. Und tatsächlich sieht das Licht des Frequenzkamms weiß aus: Es umfasst das gesamte Farbspektrum des sichtbaren Lichts.

Freilich trifft dies auch auf eine Glühbirne zu. Was den Frequenzkamm zum Messinstrument macht, ist die feste Phasenbeziehung zwischen den umlaufenden Pulsen im Resonator und denen, die im Lichtstrahl den Laser verlassen: Diese konstante Relation erinnert an Zahnräder eines Getriebes, die ineinander greifen und sich im Gleichtakt drehen. Das Resultat: Das Farbspektrum des Frequenzkamms besteht nicht aus einem Kontinuum, sondern aus mehreren hunderttausend scharfen Linien. Sie ähneln den Zinken eines Kammes – daher der Name – oder einem Zeichenkasten mit einer Unzahl sauber sortierter Buntstifte beziehungsweise den Skalenstrichen eines Lineals.

Grundlage für optische Atomuhren

Bei dieser hohen Auflösung gibt es immer eine Frequenz, die nahe genug an der spektralen Farbe eines auszumessenden Laserstrahls liegt, um eine leicht elektronisch auszählbare Schwebung von einigen hundert Megahertz zu erzeugen. Zudem lässt sich diese Skala perfekt kalibrieren. Zwei benachbarte »Zinken« liegen nämlich nur etwa 800 Megahertz (die Pulswiederholrate) auseinander, also ebenfalls noch im Radiobereich. Diese Schwebung zwischen den zwei spektralen Zinken kann eine Elektronik mit dem Signal einer Cäsium-Atomuhr vergleichen, das bei rund neun Gigahertz (Milliarden Hertz) liegt. Eleganterweise reicht es, ein einziges Frequenzpaar auf diese Weise zu eichen, um alle anderen präzise festzulegen.

Umgekehrt eignet sich der Frequenzkamm für den Bau optischer Atomuhren. Sie heißen so, weil sie mit der Frequenz von sichtbarem Licht arbeiten, also etwa tausendmal schneller und genauer als heutige Cäsium-Atomuhren. Dieses »Ticken eines Terahertz-Pendels« übersetzt der Frequenzkamm präzise in elektronisch messbare Radiofrequenzen.



Sichtbares Licht beginnt im Roten bei etwa 380 Terahertz (THz, eine Million mal eine Million Hertz) und endet im Violetten bei etwa 790 THz. Der Frequenzkamm erschließt einen Bereich von 280 bis 560 THz und unterteilt ihn in Hunderttausende feiner Linien sehr reiner Farben, also präziser Frequenz (oben angedeutet). Beim »Vergleich« mit einer unbekannten Farbe entsteht eine Schwebung im Radiofrequenzbereich, die elektronisch leicht zu bestimmen ist.

Jedem sein eigenes Längennormal

Der erste Kunde von MenloSystems war das österreichische Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen. Das neue Messgerät vereinfacht nämlich auch die Bereitstellung eines präzisen Längennormals als gesetzliche Eichgrundlage. Heutzutage wird ein Meter durch die Wellenlängen von Laserlicht sehr reiner Farbe definiert (siehe Kasten unten). Das Problem: Um die Eichsysteme in verschiedenen Messlabors zu justieren, mussten bis vor kurzem Geräte transportiert werden. Das erübrigt sich nun dank des Frequenzkamms und der Weltraumtechnik: Da GPS-Satelliten Atomuhren an Bord haben, um ein normiertes Zeitsignal zu senden, kann jedes Labor seinen Frequenzkamm daran eichen und damit wiederum seine Längennormale einstellen. ◁

Roland Wengenmayr ist Wissenschaftsjournalist und Redakteur von »Physik in unserer Zeit«.

Längenmessung mit Licht

Wie lang denn nun ein Meter ist, bestimmen Metrologen anhand der Wellenlänge von Laserlicht. Die höchste Messgenauigkeit erreichen Michelson-Interferometer. Sie trennen den Messstrahl auf, leiten die Teilstrahlen über zwei getrennte optische Wege, von denen einer justierbar ist, und vereinigen sie schließlich wieder. Bei der Überlagerung verstärken sich Berge und Täler der Lichtwellen oder löschen sich aus. Aus diesem Interferenzmuster lässt sich die Wegdifferenz der beiden Teilstrahlen ablesen. Im bisher genauesten Fall konnte so ein Norm-Meter mit einer Präzision von etwa 0,1 Nanometer (milliardstel Meter) realisiert werden. Drei Fehlerquellen limitieren diese Exaktheit: die begrenzte Präzision in der Fertigung optischer Komponenten, die Verzerrung der Wellenfronten des Lichts (Beugung) und der flache Kontrastverlauf im Interferenzmuster.

Albertus Magnus – der große Neugierige

In den Schriften des mittelalterlichen Naturforschers und Universalgelehrten lassen sich auf eindrucksvolle Weise die Anfänge einer erfahrungsorientierten Naturwissenschaft erkennen.

Von Birgit Steib und Roland Popp

Vor rund 740 Jahren erklärte Albertus Magnus, der große Gelehrte des europäischen Hochmittelalters: *Neugier spornt zu wissenschaftlichen Beobachtungen an*. Diese Neugier auf die Welt zieht sich wie ein roter Faden durch sein Leben, das etwa von 1200 bis 1280 währte. Der Predigerbruder und spätere Bischof von Regensburg war nicht nur Theologe und Philosoph, sondern auch Experte in einer Reihe heute eigenständiger naturwissenschaftlicher Disziplinen. Ob Mensch, Tier, Pflanze oder unbelebte Materie: Naturphänomene, im Großen wie im Kleinen, weckten sein Interesse. Er stellte ebenso Überlegungen zur Gestalt der Erde an wie zur Form eines Regentropfens. Der Honigmagen der Biene fesselte ihn in gleichem Maße wie die Sinneswahrnehmung des Menschen.

Diese breit gefächerte Ausrichtung verblüfft aus heutiger Perspektive. Für Albertus Magnus aber war solche Interdisziplinarität geradezu eine Voraussetzung für umfassende Erkenntnis. Schließlich wollte er nicht weniger als das Wissen seiner Zeit vollständig erfassen und in Lehrbüchern verständlich darlegen. Der »doctor universalis«, wie er später auch genannt wurde, kannte die antike und die zeitgenössische Fachliteratur. Sein Bestreben, sich nicht auf Darlegung und Kommentierung von überliefertem Wissen zu beschränken, sondern dieses durch eigene Beobachtungen und Experimente zu hinterfragen und zu ergänzen, zeugt von einem geradezu modern anmutenden Forscherdrang.

Ein rastloser Reisender

Das Gesamtwerk Alberts, der schon zu Lebzeiten den Beinamen »Magnus« (»der Große«) erhielt, erstaunt schon durch seinen bloßen Umfang. Die über siebzig Bücher und Abhandlungen, die der Gelehrte handschriftlich verfasste, würden mehr als 22 000 Druckseiten füllen. Albertus Magnus schrieb in gleicher Weise zu Mineralogie, Botanik und Zoologie wie zu Kosmografie, Wetterkunde, Physiologie oder Psychologie. In einigen Wissenschaftsbereichen gelten seine Arbeiten als bahnbrechend. So verfasste er die erste ausführliche Darstellung der mitteleuropäischen Flora und bereitete der modernen Geografie den Weg. Sein Werk zur Gesteinskunde ist der erste Versuch, eine vollständige Systematik für Mineralien zu entwickeln.

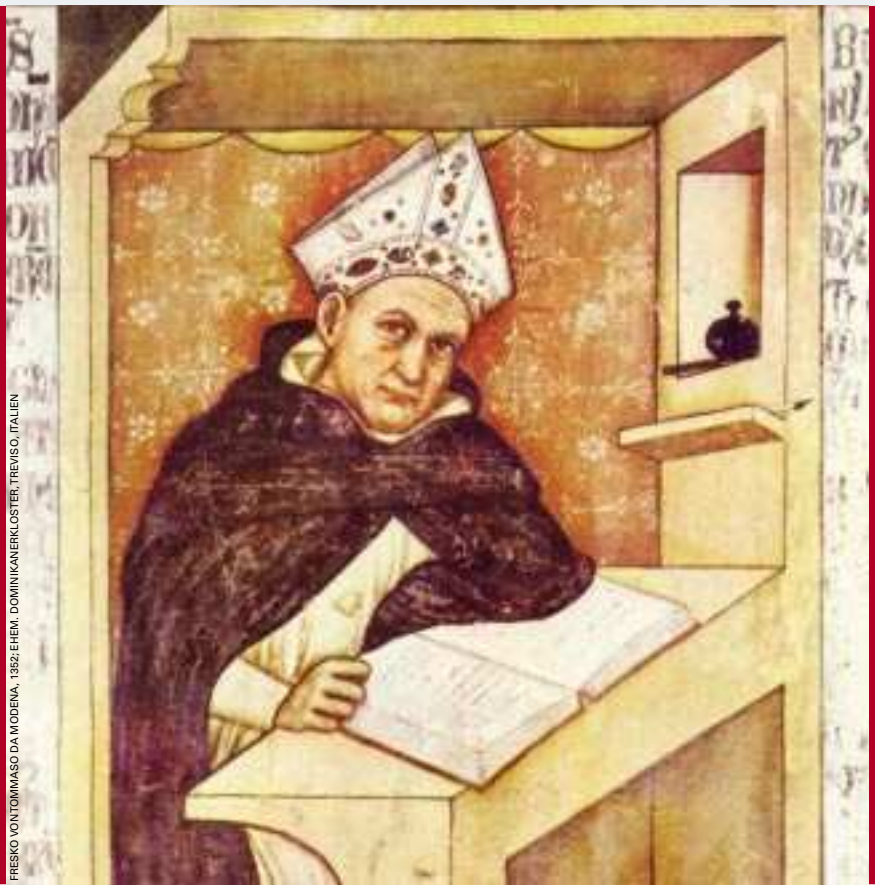
Ähnlich facettenreich wie Alberts wissenschaftliche Interessen war sein Leben. Als erster Deutscher erhielt er eine Professur in Paris, an der berühmtesten Universität seiner Zeit. In Köln engagierte er sich bei der Gründung der ersten Hochschule im deutschsprachigen Raum. Und nicht nur im akademischen Bereich erlangte er großes Ansehen: Der Dominikaner wurde auch zum Leiter der deutschen Provinz seines Ordens gewählt und schließlich zum Reichsbischof ernannt. Er fungierte oft als Schiedsrichter und Vermittler bei Streitigkeiten.

Bis ins hohe Alter blieb Albertus Magnus nicht nur geistig mobil: Ob Rom, Riga, Paris, Antwerpen oder Basel – im Laufe seines Lebens durchquerte er ganz Mitteleuropa. Gemäß den strengen Regeln seines Bettelordens bewältigte er alle Reisen zu Fuß.

Auf seinen Wanderungen hatte Albert nicht nur Gelegenheit, naturkundliche Beobachtungen durchzuführen, sondern er konnte auch die verschiedensten Bibliotheken aufsuchen. Er stützte sich auf eine erstaunlich umfangreiche Literaturkenntnis, obwohl die relevanten Schriften zum Teil an weit entfernten Orten lagerten. In seinem Buch zur Mineralienkunde merkte Albertus Magnus deshalb stolz an,

BISCHÖFLICHES ZENTRALARCHIV REGENSBURG

Mit diesem Siegel stellte Albertus Magnus während seiner Zeit als amtierender Bischof Urkunden aus.



FRESKO VON TOMMASO DA MODENA, 1352; EHEM. DOMINIKANERKLOSTER, TREVISO, ITALIEN

Wie Albertus Magnus wirklich ausgesehen hat, wissen wir nicht. Die älteste Abbildung findet sich auf einem Fresko aus dem Jahr 1352 in Treviso (Italien). Sie zeigt ihn als Dominikaner, Bischof und Gelehrten. Meist wird Albertus Magnus im Dominikanerhabit und zugleich mit der Mitra des Bischofs dargestellt.

er habe sich die Literatur *sorgfältig in aller Welt* beschafft. Da der Gelehrte manche seiner Werke in unruhigen Lebensphasen verfasste, musste er viele seiner Quellen im Gedächtnis haben.

In der Tradition der Scholastik des 13. Jahrhunderts stehend, nahm Albertus Magnus Bezug auf anerkannte Autoritäten und in der Gelehrtenwelt weit verbreitete Autoren wie Augustinus, Aristoteles, Hippokrates, Galen, Seneca oder Plinius. Seine Kenntnisse gingen jedoch weit darüber hinaus.

So zitierte er auch eine Vielzahl weniger bekannter Schriftsteller sowie Gelehrter aus dem arabischen und jüdischen Kulturkreis. Albert war der erste abendländische Gelehrte, der die Schriften von Moses Maimonides, dem wichtigsten jüdischen Religionsphilosophen des Mittelalters, umfassend rezipierte. Bei zahlreichen Fragestellungen bezog er sich auf Averroes, den bedeutenden Aristoteles-Kommentator aus dem maurischen Spanien. Und insbesondere bei Darlegungen zu Medizin, Anatomie, Physiologie und Naturbeobachtung berücksichtigte Albert die Erkenntnisse des Mediziners und Philosophen Avicenna (siehe Spektrum der Wissenschaft 1/2003, S. 84) sowie zahlreicher anderer islamischer Ärzte. Allerdings war Albert stets auf lateinische Übersetzungen angewiesen, da er selbst weder Arabisch noch Griechisch beherrschte. Seine Quellen sind trotzdem so vielfältig, dass sie kaum vollständig rekonstruiert werden können.

Eine eigene Forschungseinrichtung, das Albertus-Magnus-Institut in Bonn, ist seit 1931 mit einer kritischen Edition von Alberts Gesamtwerk beschäftigt. Diese »Editio Coloniensis« ist auf etwa siebzig Teilbände angelegt, von denen bisher 24 erschienen sind.

Aristoteles als Herausforderung

Alberts wissenschaftliches Hauptanliegen galt eindeutig dem griechischen Philosophen Aristoteles. *Wahre Philosophie muss mit Aristoteles rechnen*, verkündete er programmatisch und nahm sich ein gigantisches Projekt vor: das gesamte Werk des Aristoteles für seine Zeitgenossen zu kommentieren und verständlich zu machen. Mit der Verwirklichung dieses Vorhabens trug Albertus Magnus entscheidend dazu bei, das geschlossene, von Augustinus und Plato geprägte Weltbild durch aristotelisches Gedankengut aufzubrechen. Er versuchte, die rationale, innerweltliche, auf natürliche Ursachen ausgerichtete Philosophie des Aristoteles mit dem christlichen Weltbild zu vereinbaren. Selbstverständlich war Aristoteles schon zuvor im Abendland bekannt gewesen, doch Albert verhalf ihm zum entscheidenden Durchbruch und initiierte damit eine geistesgeschichtliche Revolution.

Manche zeitgenössischen Theologen beargwöhnten jedoch diese intensive Beschäftigung mit der antiken Philosophie, war sie doch mit der konsequenten Anwendung der Vernunft verbunden. Albert beklagte sich, dass gerade jene, die auf Grund ihrer Faulheit unfähig seien, versuchten, andere, die ihnen wissenschaftlich überlegen seien, in Misskredit zu bringen. Die Parallelen, die er zu historischen Persönlichkeiten zieht, lassen ahnen, welch massiver Kritik er zeitweilig ausgesetzt war: *Solche Leute haben den Sokrates getötet, haben Platon aus Athen gejagt, haben gegen Aristoteles gearbeitet und ihn zur Auswanderung gezwungen. Solche Menschen sind in der Gemeinschaft der Wissenschaftler das, was die Leber im Körper ist: Wie die ausfließende Galle den ganzen Körper verbittert, so gibt es auch im wissenschaftlichen Leben einige überaus bittere und gallige Menschen, die allen anderen das Leben verbittern und es nicht zulassen, in wohltuender Zusammenarbeit die Wahrheit zu suchen.*

MUSEUM FÜR DAS FÜRSTENTUM LÜNEBURG

MS. M III 36: UNIVERSITÄTSBIBLIOTHEK SALZBURG

Die um 1230 entstandene Karte aus dem Kloster Ebstorf zeigt die zur Zeit Alberts übliche Darstellung der Welt. In der Mitte liegt Jerusalem, Europa im unteren linken Viertel.

Eine Darstellung aus dem 15. Jahrhundert bildet den Kosmos zusammen mit dem Gelehrten Albertus Magnus ab. Im Spruchband wird Albert als *über alle maßen wol geleret* gepriesen.

▷ Später wurde Albert vorgeworfen, lediglich ein »Affe des Aristoteles« zu sein, der dessen Ansichten autoritätsgläubig übernehme. Doch Albertus Magnus selbst wies durchaus darauf hin, dass Aristoteles als fehlbarer Mensch zu betrachten sei. Die Zuverlässigkeit seiner wissenschaftlichen Quellen beurteilte er kritisch je nach Fachgebiet: *In Glaubens- und Sittenfragen muss man dem Augustinus mehr trauen als den Philosophen. Spräche er aber über Medizin, so würde ich dem Galen oder Hippokrates mehr Glauben schenken. Würde er sich dagegen über naturwissenschaftliche Dinge äußern, so glaubte ich mehr dem Aristoteles oder einem anderen Fachmann der Naturkunde.*

Suche nach natürlichen Ursachen

In seinen naturwissenschaftlichen Schriften ging Albertus Magnus in der Regel vom aristotelischen Wissenskatalog aus. Zum Thema Gesteine stand jedoch kein Werk des Griechen zur Verfügung. Albert musste seine Abhandlung zur Gesteinskunde, »De mineralibus«, also weitgehend selbstständig konzipieren. Sie gilt heute als Pionierarbeit der Mineralogie. Neben der Auflistung und Beschreibung einzelner Edelsteine, Metalle und Steinsalze beschäftigte sich Albert insbesondere mit der Natur der Steine, mit ihrer Entstehung und Zusammensetzung. Dabei griff er auf die aristotelische Vorstellung von den vier Elementen Wasser, Erde, Feuer und Luft zurück. Als elementare Kräfte sind sie der »Baukasten« der Natur und bestimmen die Eigenschaften aller Dinge. Wasser und Erde tendieren beispielsweise nach unten, Feuer und Luft streben nach oben. Albert wandte die antike Lehre von den vier Elementen auf alle Bereiche der Naturkunde an. Ausgehend von dieser damals gängigen Theorie argumentierte er jedoch rational und ursachenorientiert. So erklärte er in »De mineralibus«: *Aufgabe der Naturwissenschaft ist es nicht, alles, was berichtet wird, einfach hinzunehmen. Sie hat vielmehr die Ursachen im Naturgeschehen zu ergründen.*

Gesteine, so legt Albert dar, bestünden vor allem aus Erde, dem schwersten aller Elemente, und gehen daher im Wasser unter. Für Ausnahmen wie den auf dem Wasser schwimmenden Bimsstein gibt er eine experimentell überprüfbare Erklärung: In den Bimsstein sei Luft eingeschlossen, die ihn trage; zermahle man jedoch den Bimsstein, so sinke der entstandene Sand nach unten.

Mit einem Bergkristall führte Albert einen optischen Versuch durch: *Wenn man ihn in einem Innenraum so vor sich hält, dass ein Teil im Sonnenlicht ist und ein Teil im Schatten, so wirft er einen wunderschönen Regenbogen an die Wand …, und deshalb wird er Iris genannt.* In Analogie zum Regenbogen am Himmel sah er Wasserbestandteile im Kristall als Ursache für das Farbenspiel an.

In seinem Werk zur Wetterkunde »Meteora« berichtet Albertus Magnus, wie er zusammen mit vielen anderen im Jahr 1240 *einen Kometen fast beim Nordpol* sah. Die Wetterkunde fasste der mittelalterliche Gelehrte in Anlehnung an die aristotelische Vorlage sehr weit: Er verstand darunter die Betrachtung von dem, was in der Höhe entstanden ist oder in der Luft erzeugt wurde. Entsprechend behandelt er in »Meteora« Kometen und Feuerereignisse genauso wie Winde, Donner oder typische meteorologische Erscheinungen wie Nebel, Wolken oder Regen. Ausführlich diskutiert Albert beispielsweise die Ursache und den Entstehungsort des Regens sowie die runde Tropfenform, die er in der Schwere des Elements Wassers begründet sieht. Mit

eingeschlossen werden in »Meteora« sogar Themen wie Erdbeben, Vulkanismus, die Entstehung von Ozeanen sowie Fäulnisprozesse, wobei Albert ebenfalls eigene Erfahrungen mit einfließen lässt. So habe er in der Lombardei im Winter 1222/23 ein Erdbeben erlebt und in Padua beobachtet, wie bei der Reinigung eines stillgelegten Brunnens ein Mann ums Leben kam, als er in den Schacht hinabstieg. Hier führt er Moderdämpfe als natürliche Ursache an.

In dem Fachgebiet, das wir heute als Geografie bezeichnen, war Albertus Magnus, wohl auch auf Grund seiner eigenen Reisetätigkeit, die genaue Kenntnis der natürlichen Orte ein großes Anliegen. Die zu seiner Zeit üblichen Weltkarten lieferten kaum exakte geografische Informationen. Sie waren eher symbolhaft und sollten die Welt und ihre Heilsgeschichte veranschaulichen (siehe linkes Bild auf Seite 72). Ebenso waren mittelalterliche Wegekarten, wie sie etwa für Pilgerreisen zur Verfügung standen, keine geografischen Landkarten im modernen Sinn, sondern eher grobe Beschreibungen des Weges, die wichtige Stationen auflisteten. Um die Planung der Reise zu erleichtern, wurden in diesen so genannten *Itinerarien* Distanzen meist in Tagesstrecken angegeben (siehe Bild Seite 74).

»Orientierte« Karten

Albertus Magnus jedoch begann bereits damit, die Geografie als eine exakte Wissenschaft zu betrachten. Mit Vehemenz unterstrich er in seinem Werk »De natura loci« die Bedeutung von genauen geographischen Informationen: *Es gibt keine Naturwissenschaft ohne die genaue Kenntnis der geografischen Orte, ihrer Unterschiede und den Ursachen dafür; alle, die nicht nach diesen Dingen fragen, begehen einen schweren Fehler.*

Folglich beschäftigte sich Albert mit Gestalt und Größe der Erde sowie mit der Erdoberfläche und dem Klima der verschiedenen Weltregionen. Für sein geografisches Werk, das um 1250 entstand, fertigte er eine Skizze der bekannten bewohnbaren Erde an. Wie damals üblich, ist seine Darstellung nicht wie heute nach Norden, sondern nach Osten *(oriens)* ausgerichtet: Sie ist orientiert.

In Anlehnung an die antike Lehre von den Klimazonen teilte Albert die bewohnbare Erde in verschiedene Klimata ein. Er legte dar, dass die Eigenschaften der geografischen Orte nicht allein durch ihre Lage, sondern auch durch Gewässer, Wälder und Berge oder durch die Reflexion der Sonnenstrahlen beeinflusst werden. Für die Gebiete von 56 Grad nördlicher Breite (das entspricht etwa der Höhe von Kopenhagen) vermerkte er, im Winter sei es dort so kalt, dass man den Platz am warmen Ofen nicht ohne Lebensgefahr verlassen könne. Das erste Klima begann für Albert am Äquator. Obwohl antike Autoren dieses Gebiet wegen der großen Hitze für unbewohnbar hielten, mutmaßte er, dass auch auf der südlichen Erdhalbkugel Menschen lebten.

Kugelrunde Erde

Auch wenn es dem üblichen Bild vom »rückständigen« Mittelalter widerspricht: Albertus Magnus und die gesamte Gelehrtenwelt des 13. Jahrhunderts waren überzeugt, dass die Erde keine Scheibe, sondern eine Kugel sei. Albert stützte sich dabei hauptsächlich auf Aristoteles und nannte eine Reihe von Gründen für die Kugelgestalt: So können die Auf- und Untergänge der Gestirne im Osten früher, im Westen später beobachtet werden. Bei Reisen nach Süden werden neue Sternbilder sichtbar; je weiter man sich aber im Norden befindet, umso mehr Sterne bleiben stets über dem Horizont. Und wenn man sich per Schiff einer Küste nähert, werden wegen der gekrümmten Wasserfläche zuerst die Bergspitzen und dann erst die Küstenlinie sichtbar. Als weiteres Argument dienen die Beobachtungen bei einer Mondfinsternis: Der stets runde Schatten, den die Erde auf den Mond wirft, könne nur durch ihre Kugelgestalt erklärt werden.

Strittig indes war im Mittelalter die Frage, ob jenseits des bekannten Erdkreises Menschen leben könnten. Obwohl der Kirchenlehrer Augustinus die Existenz solcher »Antipoden« (wörtlich: »Gegenfüßler«) abgelehnt hatte, argumentierte Albertus Magnus für die Bewohnbarkeit der südlichen Hemisphäre. »Unten«, so Albert, sei ein relativer Begriff: *Obwohl keiner der Bewohner der unteren Hemisphäre zu uns gekommen ist, kann daraus nicht geschlossen werden, dass niemand dort lebt, denn das Ausmaß des Ozeans, der diese Länder umgibt, erlaubt ganz einfach nicht, ihn segelnd zu überqueren. ... Keine Beachtung sollte denen geschenkt werden, die sich vorstellen, Menschen könnten diese Gebiete nicht bewohnen, da sie von der Erde fallen* ▷

Kurzbiografie von Albertus Magnus

um 1200	in Lauingen an der Donau geboren
1223	Student der freien Künste in Padua; Eintritt in den Dominikanerorden
nach 1223	Theologiestudium und Priesterweihe in Köln
um 1228–1240	Lesemeister (Lektor) in verschiedenen Dominikanerklöstern
um 1240	Er geht an die Universität Paris, wo er 1245 den Titel eines Magisters der Theologie erwirbt und danach drei Jahre lang lehrt; intensive Beschäftigung mit Aristoteles und der jüdisch-arabischen Philosophie
1248	Rückkehr nach Köln, begleitet von seinem Schüler Thomas von Aquin; Leitung des dort neu gegründeten *studium generale,* der ersten deutschen Ordenshochschule der Dominikaner
1252	Er vermittelt in einem Rechtsstreit zwischen dem Erzbischof von Köln und den Bürgern der Stadt (»Kleiner Schied«)
1254–57	Provinzial (Leiter) der deutschen Dominikanerprovinz; umfangreiche Reisen innerhalb und außerhalb Deutschlands
1258	erneute Vermittlung zwischen Bischof und Bürgerschaft von Köln (»Großer Schied«)
1260–1262	Bischof von Regensburg; Sanierung des Bistums
1263–1264	Er zieht als Kreuzzugsprediger durch Deutschland und Böhmen
nach 1264	Lehrtätigkeit in Würzburg und Straßburg
1269/1270	endgültige Rückkehr in das Dominikanerkloster Hl. Kreuz in Köln
1280	am 15. November in Köln gestorben
1931	Heiligsprechung und Ernennung zum Kirchenlehrer
1941	Ernennung zum Patron der Naturwissenschaftler

DIÖZESANMUSEUM REGENSBURG

▷ *würden. Zu behaupten, dass die fallen könnten, welche die Antipodenseite bewohnen, mit anderen Worten die, welche ihrer Füße entgegengesetzt zu unseren haben, kann nur das Ergebnis der Ignoranz der einfachen Leute sein. Der untere Teil der Erde sollte nicht im Verhältnis zu uns, sondern in absoluter Weise gesehen werden. Was absolut unterhalb ist, was also von überall aus unten genannt werden muss, ist der Mittelpunkt der Erde.*

Die Vorstellung, alle Materie strebe zur Weltmitte, diente Albert auch zur Erklärung der Kugelgestalt der Erde. Seine Argumentation stützte sich dabei wiederum auf die Lehre von den vier Elementen: Besonders die beiden schweren Elemente Erde und Wasser ziehe es zum Mittelpunkt der Welt. Da sie sich in diesem Bestreben eng zusammenballten, so Albert, würden sie notwendigerweise die Kugelgestalt der Erde bedingen.

Kenner der heimischen Fauna

Ebenso wie Alberts kosmografische Schriften ist auch sein zoologisches Werk »De animalibus« noch als Originalmanuskript erhalten. Vor wenigen Jahren erschien in Baltimore (Maryland) die erste vollständige und kommentierte, mehr als 1700 Seiten umfassende Übersetzung dieses Werks aus dem Lateinischen. Alberts ausgesprochen umfangreiche Tierkunde behandelt Insekten und Spinnen ebenso wie Fische und den Menschen. Ganz deutlich hebt sich »De animalibus« von den im Mittelalter weit verbreiteten allegorischen und moralisierenden Tierbüchern, den so genannten Bestiarien, ab. Albertus Magnus beabsichtigte vielmehr, alle bekannten Unterschiede der Tiere bezüglich Körper, Vermehrung, Ernährung und Verhalten anzuführen sowie die natürlichen Ursachen für solche Vielfalt zu erörtern. Durch die detaillierte Schilderung seiner Erfahrungen, Erkenntnisse und Erlebnisse erweist sich Albert als genauer Kenner der heimischen Fauna.

Seine häufigen Reisen nutzte der Bettelbruder offenbar auch, um Bauern, Fischer oder Jäger zu befragen. Aussagen, die ihm fabulös erschienen, bezweifelte er – unabhängig davon, ob sie vom gemeinen Volk oder von anerkannten Autoritäten stammten. Entschieden kritisierte er Aussagen, die in seinen Augen der Vernunft widersprechen. So hielt er die Behauptung des römischen Schriftstellers Plinius, es gäbe eine einäugige Reiherart namens *monoculus* für unlogisch: *Es scheint, was er sagt, ist falsch und widerspricht der Natur. Denn so wie auf den Seiten zwei Flügel und zwei Füße wachsen, so ist es auch mit den Augen. Es wäre nicht sinnvoll, dass nur auf einer Seite ein Auge geformt wird, nicht aber auf der anderen Seite. Dieser Plinius sagt viele Dinge, die überhaupt nicht stimmen …*

Manche Angaben lehnte Albert deshalb ab, weil sie nicht mit seinen eigenen Beobachtungen übereinstimmten. Die Meinung, Geier würden nicht kopulieren und niemand hätte je ihre Nester gesehen, wies er als falsch zurück, da er von Geiern wüsste, die in den Bergen zwischen Worms und Trier brüteten. Auch könne man sie dort sehr häufig bei der Paarung beobachten.

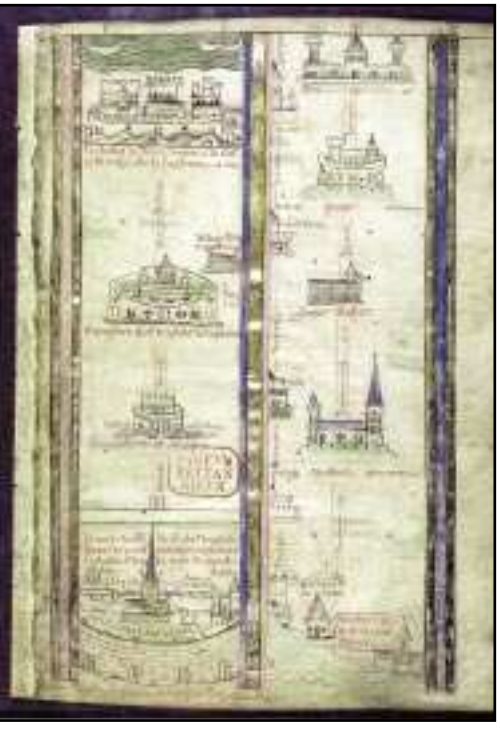
Von Ameisenlöwen und Eisvögeln

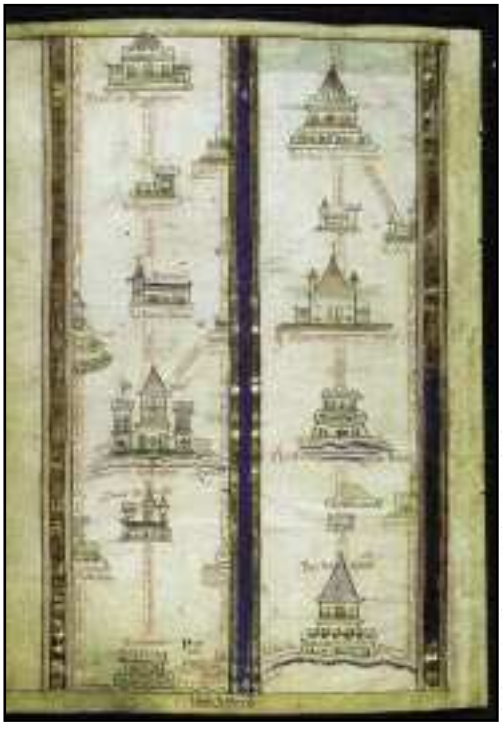
Einer Erzählung aus dem damals weit verbreiteten und einflussreichen frühchristlichen Tierbuch »Physiologus«, der Ameisenlöwe sei halb Ameise, halb Löwe und könne wegen seiner Doppelnatur keine Nahrung zu sich nehmen, entgegnete Albert: *Ich habe es oft beobachtet und meinen Gefährten gezeigt, dass dieses Tier die Gestalt einer Zecke hat und sich im Sand verbirgt, wobei es eine halbkreisförmige Vertiefung in den Sand gräbt, deren Pol der Mund des Ameisenlöwen bildet. Wenn die Ameisen auf ihrer Nahrungssuche vorbeiziehen, dann fängt er sie und verschlingt sie; das haben wir öfter gesehen.*

Albertus Magnus scheute sich nicht, Angaben, die wir heute nur noch belächeln, selbst zu überprüfen. Bei seiner Beschreibung des Eisvogels merkte er an: *Man sagt von diesem Vogel, dass er auch dann noch seine Federn wechselt, wenn man ihn häutet und das Federkleid an einer Wand befestigt. Ich habe an mehreren von ihnen überprüft, dass dies nicht stimmt.*

Großen Wert maß Albert der Erfahrung und der systematischen, »objektiven« Beobachtung bei. Er selbst schrieb dazu: *Viel Zeit ist erforderlich, um festzustellen, dass bei einer Beobachtung alle Täuschung ausgeschlossen ist. … Es genügt nicht, die Beobachtung nur auf eine bestimmte Weise anzustellen. Man muss sie vielmehr unter den verschiedensten Umständen wiederholen, damit die wahre Ursache der Erscheinung mit Sicherheit ermittelt wird.*

Entsprechend zeigen sich im Werk des Albertus Magnus Ansätze zu eigenen Experimenten. Einer Ameise entfernte er die Fühler, um herauszufinden, ob die ▷





MS. ROYAL 14 C VII, FOL. 2 + 2V; BRITISH LIBRARY LONDON

Reisende hatten zu Alberts Zeit keine Landkarten bei sich, sondern allenfalls Wegbeschreibungen auf Pergament. Diese Itinerarien listeten wichtige Reisestationen und Entfernungen schematisch auf. Hier ist ein Ausschnitt aus der Wegbeschreibung von London nach Jerusalem abgebildet.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / TERRA FORMA

Zu Fuß bereiste Albertus Magnus fast ganz Mitteleuropa. Die rot markierten Orte besuchte er von September 1254 bis September 1256. Während dieser Zeit war er als Leiter der deutschen Ordensprovinz fast pausenlos unterwegs.

▷ Insektenaugen auf den Antennen sitzen. Und bei der Biene merkte Albert an: *Ich habe aber die Anatomie der Bienen in ihren einzelnen Körperabschnitten erforscht. Dabei findet sich im Hinterleib, der auf die Einschnürung folgt, eine helle Blase. Wenn man sie öffnet und kostet, enthält sie eine Flüssigkeit, die nach feinstem Honig schmeckt.* Bemerkenswert ist diese Methode, durch Schmecken anatomische Zusammenhänge zu klären. Da bis zur Erfindung der Mikroskopie noch über 350 Jahre vergehen sollten, waren damals nur solche Strukturen zu erkennen, die mit bloßem Auge sichtbar waren.

Trotz solcher methodischer Limitationen wies Albert als Erster auf das ventral gelegene Strickleiternervensystem der Gliedertiere hin: *Auf der Bauchseite ist bei den Krebsen eine Brücke, in der das Organ verläuft, das die bewegende Kraft vom Gehirn her bringt.* Die rationale Deutung von Naturgeschehen, seine genaue und systematische Beobachtung wie auch seine Experimente machen Albertus Magnus zu einem Wegbereiter der modernen Naturwissenschaften.

Über den Menschen

Bei seinen Darlegungen zu Unterschieden und Gemeinsamkeiten zwischen den Lebewesen wird der Mensch ganz selbstverständlich mit einbezogen. Entsprechend behandelte Albertus Magnus in seiner Tierkunde auch die Anatomie und Physiologie sowie das Verhalten des Menschen. Zudem verfasste er eine Reihe von Büchern zur Psychologie. Er schrieb unter anderem über Sinne und Sinneswahrnehmungen, über Gedächtnis und Wiedererinnern, über Lebensgeist und Atem, über Träume, Wachen und Schlafen.

Bedeutend ist sein Kommentar zur Seelenlehre des Aristoteles (»De anima«). Albert nahm diese aristotelische Schrift als Grundlage, erweiterte sie um Aussagen von arabischen Gelehrten wie Alfarabi, Avicenna oder Averroes und fügte zudem eigene Ausführungen und Beobachtungen ein. Ebenso verfuhr er in seinen drei Büchern über »Schlafen und Wachen« (»De somno et vigilia«; Bild Seite 77). Der Schlaf war für Albert eine *Fessel der Sinne und der Bewegung*. Schlafen sei ihm zufolge notwendig, damit der *Spiritus sensibilis* – nach antiker Vorstellung ein sehr feiner Stoff in den Gehirnventrikeln, der maßgeblich für die Sinneswahrnehmungen ist – sich zur regelmäßigen Erholung ins Körperinnere zurückziehen könne. Dadurch blockiere er die Fähigkeit der Wahrnehmung und die Willkürmotorik. Indem sich die Flussrichtung des Spiritus umkehre, komme es zum Traum.

Ob auch Tiere schlafen und träumen so wie der Mensch, darüber war man sich im Mittelalter im Unklaren. Albert bezog eindeutig Position: *Um es kurz zu sagen: Jedes Tier wacht und schläft. Ein Tier, das Augenlider hat, wird sie im Schlaf schließen. Dass viele Tiere und nicht bloß der Mensch träumen, ist klar, da sie im Schlaf schreien. Das trifft für Pferd, Stier, Ziege, Hund und viele andere Vierbeiner zu, die lebend aus dem Mutterleib geboren werden. Hunde bellen manchmal im Schlaf, und viele andere Vierbeiner machen Ähnliches. Der Schlaf von Fischen ist bekannt aus der Tatsache, dass viele Fische gefangen werden, wenn sie vom Schlaf überwältigt werden.*

Träumen und Schlafwandeln

Ängste und Wünsche seien es, so Albert, die den Trauminhalt bestimmen. Hunger lasse uns von Speisen träumen, und Begierde führe zu sexuellem Traumerleben, das bis zum Erfahren des Koitus gehen könne. Albert diskutierte auch die Traumdeutung sowie die aus Träumen abzuleitenden Prophezeiungen. Dazu meinte er: *Nicht ganz leugnen lässt sich, dass Träume manchmal etwas bedeuten. Wer hat nicht schon selbst Träume gehabt, die später eingetroffen sind. Andererseits sind sie niemals ganz zu bejahen.* Albert wusste auch, dass wir selten von Gerüchen träumen. Er erklärte dies mit einer allgemeinen Schwäche des menschlichen Riechvermögens. Und obwohl neuere Forschungsergebnisse zur olfaktorischen Wahrnehmung zeigen, dass Albert den Geruchssinn des Menschen deutlich unterschätzt hatte, spricht eine europaweit durchgeführte Studie zum Schlafverhalten (das so genannte Siesta-Projekt) für seine Vermutung: Die Probanden berichten tatsächlich fast nie von »duftenden« Traumerlebnissen.

Dem Phänomen des Schlafwandelns widmete Albert ein eigenes Kapitel: *Wenn der Schlaf auch eine Fessel für die Sinne und die Bewegungen ist, so muss man doch wissen, dass bestimmte Menschen sich trotzdem bewegen und dabei Tätigkeiten ausführen, ganz so, als wären sie wach: Sie können zum Beispiel im Schlaf herumgehen oder reiten oder irgendetwas suchen oder Feinde verfolgen und dieselben vielleicht sogar töten – und kehren dabei doch als Schlafende zum Bett zurück.* Diese Schilderung von Somnambulismus mag zunächst abwegig klingen, doch wird in der modernen schlafmedizinischen Literatur neben den be-

kannten automatischen Verhaltensweisen in seltenen Fällen auch von aggressiven Handlungen während somnambuler Episoden berichtet. Viele der Beobachtungen Alberts sind also auf der phänomenologischen Ebene durchaus zutreffend, die meisten physiologischen Erklärungsansätze entsprechen jedoch dem Erkenntnisstand der damaligen Zeit und sind längst überholt. Dennoch ist in Alberts psychologischen Schriften eine weitgehend »naturwissenschaftliche« Betrachtungsweise des Schlafens und Wachens wie auch der Träume unverkennbar.

Pflanzenkundig

Besonders in den sieben Büchern von »De vegetabilibus« findet sich eine Vielzahl von Hinweisen zur Heilkunde. So empfahl Albertus Magnus als Abhilfe bei nächtlichen Albträumen, die Früchte der Pfingstrose zusammen mit Honigwein zu trinken. Bei seiner Heilkunde stützte er sich auf die antike Lehre der vier »Körpersäfte«: Blut, Schleim, gelbe und schwarze Galle. Diesen wurden spezifische Eigenschaften und Temperamente zugeschrieben. Die richtige Mischung der vier Säfte, so die damalige Vorstellung, bedeute seelische Ausgeglichenheit und körperliche Gesundheit, ein Ungleichgewicht der Säfte hingegen führe zur Krankheit. Heilpflanzen mit ihren Eigenschaften »warm«, »kalt«, »trocken« oder »feucht« sollten dazu beitragen, die Säfte wieder ins rechte Lot zu bringen. Obwohl Albertus Magnus auf die Wirkung und die Verwendung von Pflanzen hinweist, unterscheidet sich seine Pflanzenkunde von den damals üblichen, primär heilkundlich ausgerichteten Kräuterbüchern.

Albert betonte, sein Traktat über Kräuter sei *anders, als es von einem Arzt besprochen wird*. Weitgehend ohne zeitgenössische Parallelen ist sein Interesse an den Pflanzen an sich. Breiten Raum nimmt in »De vegetabilibus« die allgemeine Botanik ein. Albert diskutiert darin die Natur der Pflanzen, ihre Wachstumsbedingungen und Wuchsformen, das Aussehen und den Aufbau ihrer Blätter, Blüten, Samen und Früchte. Er behandelt deren Form, Farbe, Geruch und Geschmack. Etwa 390 Bäume und Kräuter werden einzeln vorgestellt. Zudem beschreibt Albert die Kultivierung von Pflanzen, den Wein- und Ackerbau sowie die Bepflanzung von Zier- und Obstgärten.

Bemerkenswert sind einige seiner morphologischen Überlegungen. So differenziert er präzise zwischen Dornen und Stacheln – eine Unterscheidung, die heute noch in der Botanik gültig ist. Die Ranken des Weines erkennt er als blattgegenständig. Da sie wie die Reben stets einem Blatt gegenüberstehen, vermutet er, sie könnten *unentwickelte Trauben* sein. Mit solchen ausführlichen Darstellungen der mitteleuropäischen Flora entwickelte sich Albertus Magnus zu einem Botaniker, dessen Leistungen mehrere Jahrhunderte lang nicht übertroffen wurden.

In Alberts naturkundlichen Werken lassen zahlreiche, detaillierte Beschreibungen zur mittelalterlichen Alltagskultur und Technik erkennen, dass er auch reges Interesse an den praktischen Dingen des Lebens zeigte. Bei seinen botanischen Erläuterungen über die Kiefer erklärt Albertus Magnus genau, wie ein Doppelofen zur Gewinnung von Holzteer aufgebaut ist. Und unter dem Stichwort Eiche schreibt er nicht nur über das Aussehen des Baumes, sondern auch über die Herstellung von schwarzer Tinte aus Eichengallen und Eisen. In »De animalibus« empfiehlt er, Schuhsohlen aus Eselsleder anzufertigen, da er dieses für besonders robust und widerstandsfähig hält. Allerdings würde das Leder mit der Zeit so zäh werden, dass man es nicht mehr am Fuß ertragen könne.

Ein Leben in Wanderschuhen

Das naturkundliche Interesse des Albertus Magnus regte sich wohl schon in jungen Jahren. Einen Hinweis darauf liefert etwa in »De animalibus« die Beschreibung einer Falkenjagd, die er mit den Worten einleitet: *Als ich noch jung war und mit den Hühnerhunden auf die Jagd ging …* Auch ▷

MS. 3462 FOL. 1 RECTO; BIBLIOTHÈQUE MAZARINE PARIS

Alberts Werk »Über Schlafen und Wachen« in einer Abschrift aus dem 13. Jahrhundert: Der Aristoteles-Text in der Mitte ist vom Kommentar des Averroes umgeben. Den äußeren Rahmen bildet Alberts eigener Kommentar.

AUS: »NEW KREUTERBUCH« VON LEONHART FUCHS; UNIVERSITÄTSBIBLIOTHEK TÜBINGEN

Von seinen Wanderungen war Albertus Magnus die Wegwarte *(Cichorium intybus)* vertraut: *Cicorea ist ein Kraut, das in harter und zusammengetretener Erde dicht neben Wegen wächst; sie hat einen sehr harten, aber dennoch nicht holzigen Stängel, sie hat keine sehr breiten Blätter und hat eine azurblaue oder hyazinthblaue Blüte. Diese breitet sich bei Sonnenaufgang auseinander und schließt sich bei Sonnenuntergang, so wie es noch viele andere Blüten tun.*

waren Albert, der um 1200 in Lauingen an der Donau geboren wurde, Fauna und Flora seines Heimatflusses vertraut. So erwähnt er, wie er von seinem Wohnsitz aus Fische beobachtet habe. Als etwa Zwanzigjähriger verließ »Albert von Lauingen« seine schwäbische Heimat, um an der Universität Padua die freien Künste zu studieren. Im deutschsprachigen Raum gab es zu jener Zeit noch keine Hochschule. Bereits hier zeigt sich Alberts Pioniergeist: Die Universität Padua war erst 1222 gegründet worden. In der oberitalienischen Stadt schloss sich Albertus Magnus den Dominikanern an, einem noch jungen Bettelorden. Bildung und wissenschaftliche Betätigung wurden bei den Dominikanern von Anfang an als äußerst wichtig angesehen.

Das weitere Leben des Bettelbruders war geprägt durch ausgedehnte Reisen, die er gemäß den Regeln seines Ordens stets zu Fuß bewältigte. Zunächst begab er sich zur theologischen Ausbildung nach Köln. Dann unterrichtete er selbst etwa zehn Jahre lang an mehreren deutschen Ordensschulen, darunter Regensburg, Hildesheim, Freiburg und Straßburg. Um 1240 wurde Albert zur Weiterbildung nach Paris geschickt, wo sich die angesehenste und berühmteste Universität seiner Zeit befand. Dort erhielt Albert als erster deutschsprachiger Dominikaner den Titel eines Magisters und übernahm einen Lehrstuhl. Er begann, sich als Theologe, Philosoph und Naturwissenschaftler einen hervorragenden Namen zu machen. In Paris erwarb er sich das Wissen und das Ansehen, die ihm als einzigem Gelehrten in der Geschichte den sonst bedeutenden Herrschern vorbehaltenen Beinamen »der Große« einbrachten. Einer seiner Schüler wurde Thomas von Aquin. Zusammen mit ihm ging Albert Ende der 1240er Jahre zurück nach Köln, um dort ein *studium generale* aufzubauen. Die dominikanische Ordenshochschule gilt als erste deutsche Hochschule und als Vorläuferin der Universität Köln.

Krisenmanager

Albertus Magnus verstand sich nie als Gelehrter im Elfenbeinturm. Dies verdeutlicht insbesondere sein umfassendes Engagement im pastoralen und gesellschaftlichen Bereich. Seine Befähigung als Krisenmanager stellte er in Regensburg unter Beweis, wo er 1260 als Albert II. das Bischofsamt übernahm. Innerhalb weniger Monate gelang es ihm, den desolaten Zustand und die finanzielle Misere des Bistums zu beheben. Das Amt des Reichsbischofs von Regensburg hatte Albert allerdings nur zwei Jahre inne: Kaum hatte er die Diözese geordnet, trat er zurück.

Albert besaß nicht nur Organisationstalent, sondern auch hervorragende Fähigkeiten als Friedensschlichter und Vermittler: 25 Schiedsverfahren und Friedensvermittlungen von ihm sind überliefert. Dabei ging es um so unterschiedliche Probleme wie Begräbnisrechte, das Münzwesen, Patronatsrechte oder Zehnte. An der päpstlichen Kurie verteidigte er die Bettelorden vor den Angriffen durch den Weltklerus. Am bekanntesten sind Alberts Leistungen bei der Vermittlung zwischen der aufbegehrenden Kölner Bürgerschaft und ihrem Stadtherrn, dem Erzbischof. Alberts Kölner Schiedsspruch von 1258 ging als »Großer Schied« in die Geschichte ein. Bis heute gilt dieses Dokument als erste Kölner Verfassungsurkunde.

Alberts Ruhm verbreitete sich schon zu seinen Lebzeiten. *Mein Lehrer, der Herr Albert* ist *wahrhaft ein Staunen erregendes Wunder unserer Zeit* – so pries ihn sein Schüler Ulrich von Straßburg. Doch stand er oft im Ruf, ein Magier und Zauberer zu sein – *magnus in magia*. Seine Bedeutung als Wissenschaftler wurde erst im 20. Jahrhundert in vollem Umfang gewürdigt. 1941 wurde er schließlich zum Patron, Fürsprecher und Vorbild aller Naturwissenschaftler ernannt.

Noch heute faszinieren das umfassende Wissen und die Vielseitigkeit des Albertus Magnus, sein Forscherdrang auf allen Gebieten und seine immense Neugier auf die Welt. *Wissen wollen, um des Wissens willen,* ist für ihn *eine ernsthafte Beschäftigung und kein eitles Unterfangen.* Dieses unermüdliche Streben nach Wissen machte ihn zu einem Experten auf vielen Gebieten und prägte eine Interdisziplinarität, welche wir in diesem Umfang gar nicht mehr erreichen können. Kritisch setzte er sich mit den Autoritäten aus den jeweiligen Fachdisziplinen auseinander. Sein Vertrauen auf die Vernunft, sein Bestreben, die natürlichen Ursachen im Naturgeschehen zu erforschen, und sein Pochen auf die Bedeutung von Beobachtung und Erfahrung lassen uns das mittelalterliche Universalgenie rückblickend als Pionier der modernen Naturwissenschaft erscheinen.

Birgit Steib, promovierte Biologin, ist als Fachreferentin für Ökologie tätig. **Roland Popp** ist Diplompsychologe und Somnologe im Schlafmedizinischen Zentrum der Universität Regensburg. Beide betreiben die Agentur »Wissensräume«, in deren Rahmen sie für die Stadt Regensburg ein museumsübergreifendes Konzept für eine Ausstellung über den mittelalterlichen Universalgelehrten Albertus Magnus entwickelten.

Albertus Magnus. Von Walter Senner (Hg.). Akademie-Verlag, Berlin 2001.

Die Wahrnehmungspsychologie und Sinnesphysiologie des Albertus Magnus. Von Peter Theiss. Lang, Frankfurt am Main 1997.

Albertus Magnus, On Animals: A Medieval Summa Zoologica. Übers. und Kommentar von K. F. Jr. Kitchell und M. Resnick, Baltimore 1999.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

1953

Elektrische Pumpe gegen Platten

Wie handlich elektrische Kompressionsaggregate sein können, zeigt die neue Pumpe für Autoreifen, die aus der Autobatterie gespeist wird. Sie hat eine Leistungsaufnahme von etwa 70 Watt … und wird von The Alverton Engineering Co. Ltd., London, hergestellt. Ein Reifen mittlerer Größe kann in acht Minuten »from dead flat« auf über 2 at aufgepumpt werden. Über ein Zusatzteil kann der Druckverlust, der z. B. durch ein kleines Loch im Reifen entsteht, während der Fahrt kompensiert werden. Dieser »get-you-home-device« besteht aus einer längeren Zuleitung vom Kompressor zu einer drehbaren Gelenkverbindung … und aus einem kürzeren Schlauch, der von diesem Gelenk zum Reifenventil führt. *(Umschau, 53. Jg., Heft 21, 1953, S. 669)*

▲ Trotz Loch im Reifen noch nach Hause – mit dem »get-you-home-device«- Zusatzteil zur elektrischen Luftpumpe

Strom lässt Herz schlagen

Auf dem Kongreß der American Heart Association in Atlantic City berichtete Dr. Paul M. Zoll, Boston, über die erfolgreiche Anregung der Herztätigkeit bei Patienten dadurch, daß elektrische Impulse im Takt der Herztätigkeit durch die Brust der Kranken geleitet wurden. Nach diesem Verfahren konnte bei einem Patienten, dessen Herz wiederholt auszusetzen drohte, die Herzaktion über fünf Tage aufrechterhalten werden – so lange, bis das Herz selbst wieder normal und selbständig zu arbeiten begann. *(Orion, 8. Jg., Nr. 21/22, 1953, S. 865)*

Radioaktivität in der Küche

In Laboratorien beschäftigen sich Wissenschaftler mit der Frage, was mit radioaktiven Stoffen am besten zu machen sei. Einige dieser Experimente werden den Hausfrauen zum Segen gereichen. So helfen radioaktive Atome, viele Gebrauchsgegenstände des täglichen Lebens vor dem Verderb zu schützen. Zu diesem Zweck werden Moleküle der Zellulose radioaktiv gemacht, jener Substanz, die den Hauptbestandteil von Holz, Papier, Baumwolle … usw. bildet … Gute Fortschritte auf diesem Gebiet erzielte man in der Nahrungsmittelindustrie … Nach einer Bestrahlung mit radioaktiver Substanz werden die Keime getötet, aber Nährwert und Geschmack erhalten. Diese »kalt« sterilisierten Lebensmittel brauchen nicht in Kühlschränken aufbewahrt zu werden. Es besteht keine Gefahr, daß sie selbst radioaktiv werden. (*Industriekurier Wochenausgabe Technik und Forschung, 6. Jg., Nr. 171, 1953, S. 378)*

Erste klimatisierte Weltausstellung

Die künstliche Kühlung sämtlicher Ausstellungsräumlichkeiten wird eine Neuerung sein, die zum ersten Mal auf der Weltausstellung in St. Louis 1904 zur Anwendung gelangt. Durch die riesenhafte Anlage für die Erzeugung von kalter Luft ist die Ausstellung in der Lage, in allen Gebäuden Rohrleitungen zu ziehen, durch welche künstliche Kälte während der heissesten Zeit des Sommers beständig zugeführt wird … Gewisse Nahrungsmittel sollen sich bei künstlicher Kälte viel besser halten, als auf Eis. Ausserdem wird Unreinlichkeit, Zeitverlust und dauernde Überwachung bei der in Röhren zugeleiteten Kälte gegenüber der Verwendung von Eis vermieden. *(Zeitschrift für die gesammte Kohlensäure-Industrie, IX. Jg., Nr. 22, 1903, S. 772)*

Sonne und Radioaktivität

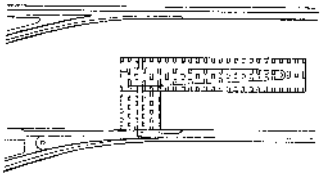
Da wir jetzt wissen, daß ein Atom fähig ist, in sich selbst einen enormen Energievorrat zu besitzen, haben wir, glaube ich (G. H. Darwin), kein Recht zu behaupten, daß die Sonne unfähig sei Atom-Energie in einer Intensität frei zu machen, die vergleichbar ist mit der, die sie entwickeln könnte, falls sie aus Radium bestünde. Dementsprechend sehe ich keinen Grund ein, daran zu zweifeln, daß man die aus der Gravitationstheorie abgeleitete Abschätzung des Energievorrates der Sonne sehr wohl durch einen solchen Faktor auf den zehn- oder zwanzigfachen Betrag erhöhen könnte. *(Naturwissenschaftliche Wochenschrift, N. F. 3, Nr. 9, 1903, S. 142)*

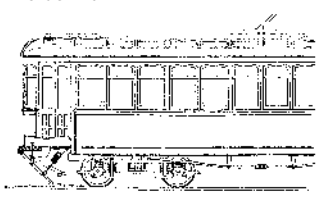
Automatische Weiche für Trambahn

1903

Die Keefer Car Switch Co. in Albany hat eine neue Weiche auf den Markt gebracht, welche ohne Anhalten des Wagens automatisch vom Wagen aus gestellt werden kann, sodass einmal an Zeit gespart und ausserdem der Weichensteller überflüssig wird.

Die Weiche besteht aus einer Grundplatte, auf welcher eine Hebelplatte drehbar gelagert ist … An dem Vordergestell des Wagens ist ein Hebel angebracht, der … einen auf die vorgenannte Hebelplatte einwirkenden Schuh trägt … Soll die Weiche umgestellt werden, so hat der Wagenführer nur nöthig, mit dem Fuss auf einen Kolben zu treten, sodass sich der Schuh senkt und an der Kante der Weichenhebelplatte entlang gleitet und so dieselbe umlegt. *(Zeitschrift für Transportwesen und Strassenbau, XX. Jg., Nr. 31, 1903, S. 490)*





▼ Spart Zeit und Arbeitskräfte – die neue automatische Weiche für Strassenbahnen, die vom Wagenführer während der Fahrt gestellt werden kann.

FEUERKUGEL

Rätsel um den Neuschwanstein-Meteoriten gelöst?

Mehr als ein Jahr nach der spektakulären Feuerkugel im Frühjahr 2002 scheint der Meteoriten-»Fall« mit dem Fund eines dritten Bruchstücks weitgehend aufgeklärt.

Von Karl Wimmer

Am Abend des 6. April 2002 hatte der Fall einer Feuerkugel im österreichisch-bayerischen Grenzgebiet viel Aufsehen erregt (siehe Spektrum der Wissenschaft 10/02, Seite 12). Nun kommt zunehmend Licht in den Ablauf des Ereignisses. Der Autor – Physiker und Bergsteiger – konnte kürzlich auf Grund verfeinerter Berechnungen das mit knapp drei Kilogramm vorerst größte Bruchstück des Meteoriten bergen, der nach dem nahe gelegenen Schloss Neuschwanstein benannt wurde.

Bereits drei Monate nach dem Aufleuchten der Feuerkugel war ein erstes Bruchstück von 1750 Gramm Masse gefunden worden. Wissenschaftler der Max-Planck-Institute in Mainz und Heidelberg untersuchten den außerirdischen Brocken gründlich und identifizierten ihn als äußerst seltenen Enstatit-Chondriten des Typs EL6. Dies überraschte die Forscher, denn zunächst hatte man wegen der frappierenden Bahngleichheit mit dem 43 Jahre früheren Meteoritenfall von Pribram (Tschechien) einen gewöhnlichen H5-Chondriten erwartet. Das wertvolle Stück ist inzwischen im Rieskrater-Museum Nördlingen dauerhaft für die Öffentlichkeit zugänglich.

KARL WIMMER

Der Meteorit ist nach gut einem Jahr auf der Geröllhalde mit einer Rostschicht überzogen.

Die nächste Besonderheit brachte der Fund eines zweiten, sehr ähnlichen Stückes von 1630 Gramm Masse im Mai 2003. Es war rund einen Kilometer nördlich vom ersten niedergegangen und lässt auf hohe Geschwindigkeiten der Fragmente quer zur Flugrichtung des Ursprungskörpers schließen. Dieser muss demnach außerordentlich heftig zerborsten sein, was durch einen beobachteten hellen Lichtausbruch in knapp 22 Kilometer Höhe untermauert wird.

Meteoritensuche mit Computer und Internet

Auch das dritte und neueste Fundstück verblüfft zunächst durch seine Fundlage. Es lag, bezogen auf die Flugrichtung, hinter seinen kleineren Brüdern und zwar viel weiter rückwärts, als man nach seiner Masse von fast 3000 Gramm hätte erwarten können. Der Grund dafür liegt in der für die Aerodynamik maßgeblichen Form, die letztlich den Schlüssel zum Verständnis des Falls liefert.

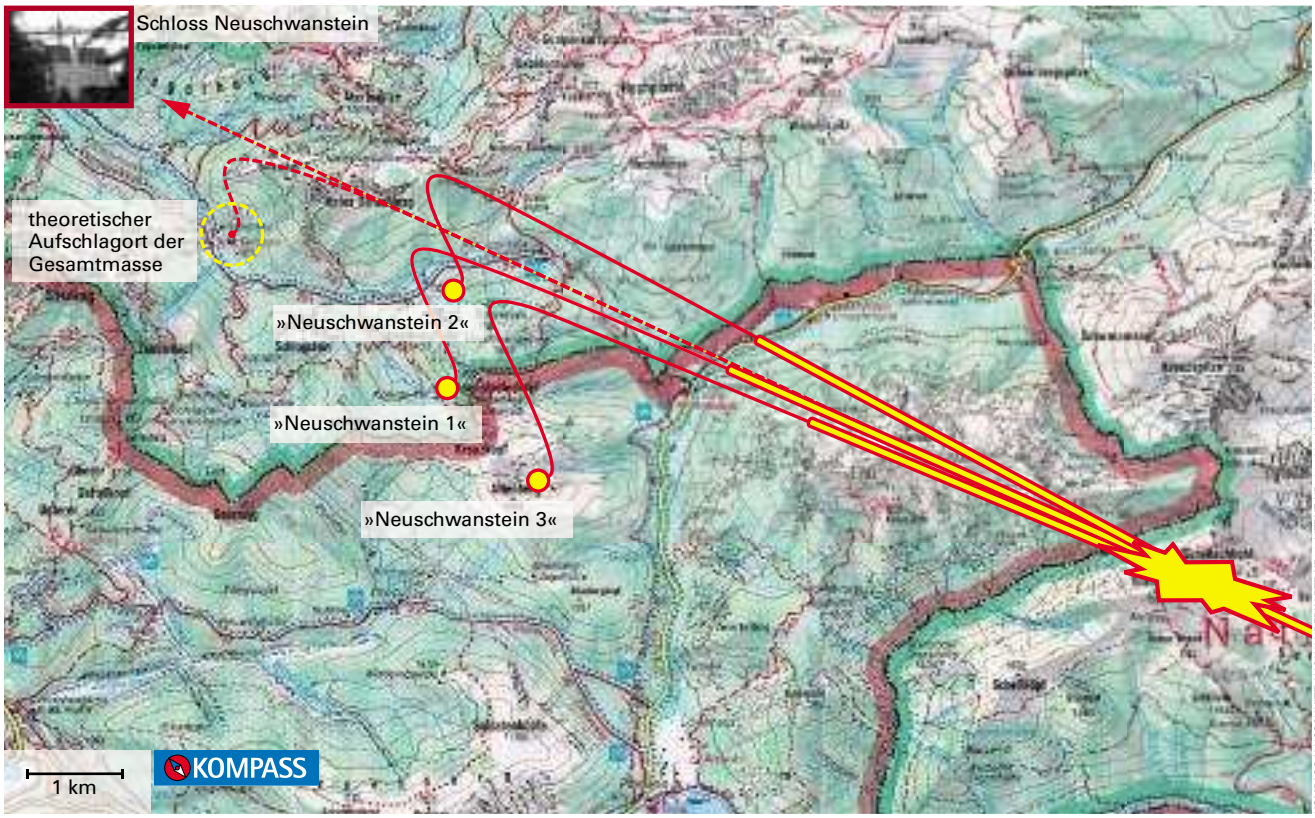
Eigentlich hatten die Besonderheiten aber schon mit der Leuchtspur des Ursprungskörpers – des so genannten Meteoroiden – begonnen. Mit Hilfe von Aufzeichnungen des Europäischen Feuerkugelnetzes konnte sie räumlich rekonstruiert werden. Sie begann in 85 Kilometer Höhe bei Schwaz im Inntal und endete über dem Ammergebirge in einer mit 16 Kilometer ungewöhnlich niedrigen Höhe. Experten vom Observatorium Ondrejov bei Prag errechneten daraus ein mögliches Einschlagsgebiet von einigen Quadratkilometern Größe. Die Hauptmasse wurde zunächst auf 15 Kilogramm, später auf immerhin noch 7 Kilogramm taxiert. Die Jagd nach ihr blieb jedoch trotz mehrerer Suchexpeditionen erfolglos.

Die Herausforderung durch das ungelöste Rätsel in den vertrauten Hausbergen des Autors begann recht einfach mit der Frage, wie sich ein mit hoher Geschwindigkeit in die Erdatmosphäre eindringender Meteoroid eigentlich verhält. Man kann sich die Flugbahn vorstellen wie die eines hart schräg nach unten geschlagenen Federballs. Anfangs zischt er geradlinig durch die Luft, wird dann stark abgebremst und fällt schließlich buchstäblich wie ein Stein fast senkrecht zu Boden, nur noch abgetrieben durch den Wind.

Genaueres lieferte im nächsten Schritt ein physikalisches Modell, für das unter anderem die Windverhältnisse zur Zeit und am Ort des Ereignisses bis in große Höhen rekonstruiert werden mussten. Das Internet erwies sich bei alledem als ergiebige Quelle für die benötigten Daten. Bald gab das Modell die veröffentlichten Eckdaten der Leuchtspur und den Fundort des ersten Findlings richtig wieder und erlaubte es, hypothetische Fragmente mit dem Computer zu simulieren.

Die notwendige Zusatzinformation für eine gezielte Suche kam von der Arbeitsgruppe um Pavel Spurny vom Ondrejov-Observatorium. Die Wissenschaftler hatten bereits kurz nach dem großen Lichtblitz nach akribischer Analyse der Leuchtspur einen letzten Geschwindigkeitswert für ein mögliches Hauptfragment abgeschätzt. Dieser ziemlich niedrige Wert von 8,7 Kilometern pro Sekunde in 19,7 Kilometer Höhe wollte zunächst nicht so recht ins Bild passen. Er deutete eher auf einen kleineren Körper oder einen mit besonders hoher Luftreibung hin.

Das nach der Modellrechnung dazu passende Einschlagsgebiet lag nahe der österreichisch-bayerischen Grenze und maß etwa 300 mal 700 Quadratmeter. Nur ein Teil dieses Areals in Höhen zwischen 1400 und 1800 Metern ist gut begehbar. Der andere Teil führt in extreme Steilhänge und dichte Latschenfelder. Angesichts der vielen Unsicherheiten und nach einem zwölf-Stunden-Alleingang im unwegsamen Gelände war der Autor dann doch freudig überrascht, als er rechtzeitig zum Jahrestag des ersten Fundes den neuen Meteoriten vor sich hatte: Dieser präsentierte sich auf einer zwar abgelegenen, aber provozierend of-



KOMPASS (AUSSCHNITT AUS WANDERKARTE NR. 4; LIZENZ NR. 64-1003-L) / KARL WIMMER / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Nach der Explosion des Ursprungskörpers über dem Gipfel des Schellschlicht verlängerten die größten Bruchstücke die Leuchtspur um einige Kilometer nach Nordwesten. Im nachfolgenden Dunkelflug wurden sie vom Wind sozusagen um die Ecke abgetrieben und um bis zwei Kilometer nach Südosten abgelenkt.

fenen Geröllhalde nur 120 Meter abseits vom Zentrum des Suchgebiets.

Der Findling hat eine Masse von 2844 Gramm und ist zu fast neunzig Prozent von einer Schmelzkruste bedeckt. Das raue Bergklima hat ihm schon etwas stärker zugesetzt als seinen Vorgängern. Vor allem aber unterscheidet er sich durch seine lang gestreckte Form. Sie erklärt nachträglich die stärkere Abbremsung und den Einschlagsort.

Das Schicksal der Feuerkugel

Der Lohn der Mühe besteht über den Fund hinaus in dem in sich schlüssigen Bild, welches das Modell auf Grund weniger einfacher Annahmen vom Schicksal der Feuerkugel zeichnet. Demnach traf der Meteoroid mit einer Gesamtmasse von etwa 300 bis 400 Kilogramm mit 21 Kilometern pro Sekunde auf die obersten Luftschichten. Beim Zusammenprall mit den Luftmolekülen wurde er regelrecht sandgestrahlt und oberflächlich angeschmolzen. Durch die Aufheizung platzten zusätzlich kleinere und größere Splitter von ihm ab, sodass er nach etwa vier Sekunden und 83 Kilometern Weg durch die Atmosphäre auf rund ein Sechstel geschrumpft war. Das Aufsehen erregende Leuchten und das Geräusch der Überschall-Stoßwelle steigerte sich dabei zum Furioso.

Hätte er seinen Weg als kompakter Brocken an einem windstillen Tag fortsetzen können, hätte er durchaus ein Loch in das Dach von Schloss Neuschwanstein schlagen können. So gesehen haben die Namensgeber des ersten Findlings eine weitsichtige Wahl getroffen. Tatsächlich aber wehte in der Höhe ein kräftiger Wind aus Nordnordwest, der während des minutenlangen freien Falls für einen Versatz von etwa zwei Kilometern sorgte. Damit war eher das Dach des königlichen Jagdhauses in der Bleckenau gefährdet. Doch auch dort schlug nichts ein, weil der Brocken während der immensen Bremsung mit mehr als 1300facher Erdbeschleunigung hoch über dem Gipfel des Schellschlicht zerbarst, nur wenige Zehntelsekunden bevor er das Schlimmste überstanden gehabt hätte. Was von ihm übrig blieb, sind die drei bisher geborgenen Meteoriten, eine unbekannte Anzahl weiterer Fragmente von maximal einem Kilogramm Masse und viele Splitter bis herab zu Staubkörnern. Ein Bruchstück, das noch größer ist als unser jüngster Fund, wird zur Abrundung des Bildes nicht benötigt. Freilich ist es auch nicht auszuschließen. Es könnte zum Beispiel als »dynamischer Zwilling«, der die gleiche Größe und die gleichen Flugeigenschaften wie das jetzt aufgefundene Stück hätte, durch die Analyse geschlüpft sein.

Bedauerlicherweise erlaubt die Schärfe der Beobachtungsdaten kein endgültiges Urteil. Dazu bräuchte man vor allem hoch aufgelöste Aufnahmen der Feuerkugel, auf denen sich die Hauptfragmente abzeichnen. Die Technik dafür gibt es bei den Forschern in Ondrejov, nämlich automatische Kameras mit lichtstarker und hoch präziser Zeiss-Fisheye-Optik.

Doch ausgerechnet dieser Station war die Sicht verstellt. Die deutschen Stationen des Feuerkugelnetzes hingegen arbeiten noch mit Kleinbildkameras, die den Nachthimmel indirekt über zwar sehr genau gewölbte Spiegel aufnehmen, dabei aber nur eine geringe Auflösung erzielen. Angesichts der spannenden Beiträge zur Geschichte unseres Planetensystems, welche die interplanetarische Forschung mit sparsamem Aufwand leistet, würde man sich die vergleichsweise geringen Investitionen in die fortgeschrittenere Technik wünschen. Je eine Station in Deutschland und Österreich, strategisch gut platziert, ergäben schon eine erhebliche Verbesserung.

Es bleibt die Frage nach dem Schicksal des jüngsten Findlings. Er ist buch- ▷

▷ stäblich in juristisches Niemandsland gefallen, denn in der Rechtsprechung kommt ein Körper wie er schlicht nicht vor. Am ehesten ist er noch als – wenn auch außerirdisches – Mineral einzuordnen, für dessen Entnahme aus der Natur nur die Einschränkung auf zerstörungsfreie Methoden festgelegt ist. Das erklärte Interesse des Finders besteht darin, die wissenschaftliche Auswertung sicherzustellen und der Öffentlichkeit zugänglich zu machen. Schließlich entwickelt sich der Fall mehr und mehr zum außergewöhnlichsten einer Hand voll weltweit, bei denen Beobachtung, Funde und wissenschaftliche Interpretation so voll und ganz zusammenpassen. Und auf die nächste Überraschung darf man schon gespannt sein. ◁

Karl Wimmer ist promovierter Physiker und Wissensentwickler in der Karbon- und Grafittechnologie.

WELTRAUMRECHT

Haftpflicht im All

Immer mehr private Unternehmen beteiligen sich an der Nutzung des erdnahen Weltraums. Dies stellt neue Anforderungen an die rechtlichen Rahmenbedingungen.

Von Susanne U. Reif

Grundlagen und Form vieler Aktivitäten im Weltraum haben sich in den letzten zehn Jahren stark gewandelt. So sind im Bereich der Satellitenkommunikation zahlreiche neue Privatunternehmen entstanden, wenngleich sich die herausragenden wirtschaftlichen Erwartungen, die in den 1990er Jahren in diesen Sektor gesetzt wurden, nicht erfüllt haben. Zudem wurden drei der fünf zwischenstaatlichen Organisationen für die internationale und regionale Satellitenkommunikation (Intelsat, Inmarsat und Eutelsat) privatisiert. Raketenstarts und Transporte von Satelliten ins All werden von Privatunternehmen ebenso angeboten wie Bilder von der Erde, deren hohe Auflösung bis vor kurzem militärischen Anwendungen vorbehalten war. Zugleich nimmt zwischen öffentlichen Forschungs- und Infrastruktureinrichtungen und privaten Satellitenunternehmen der Wettbewerb um Orbitalpositionen und Sendefrequenzen zu.

Da der Beginn der Raumfahrt ausschließlich durch staatliche Aktivitäten geprägt war, wurden diese im Wesentlichen durch völkerrechtliche Verträge geregelt. Die hierbei entstandenen Übereinkommen gewährleisten auf zwischenstaatlicher Ebene die freie Nutzung des Weltraums auf der Basis gegenseitiger Rücksichtnahme. Sie setzen gewisse Grenzen – beispielsweise dürfen keine Massenvernichtungswaffen im Weltraum stationiert werden – und enthalten Regeln für die Haftung von Staaten bei Unfällen und Schäden. Um aber auch Privatunternehmen Klarheit und Sicherheit über ihre jeweiligen Rechte und Pflichten bei den verschiedenartigen Nutzungen des Weltraums zu bieten, sind weitere Rahmenbedingungen erforderlich, welche die privaten Weltraumaktivitäten stärker berücksichtigen.

Rechte und Pflichten privater Akteure

Gemäß dem Weltraumvertrag von 1967 steht es allen Staaten »frei, den Weltraum einschließlich des Mondes und anderer Himmelskörper ohne jegliche Diskriminierung, gleichberechtigt und im Einklang mit dem Völkerrecht zu erforschen und zu nutzen«. Dabei sind Privatpersonen oder -unternehmen nicht ausgeschlossen, sondern ausdrücklich zugelassen. Allerdings tragen die Staaten die Verantwortung für »ihre« privaten Akteure. Besonders bedeutsam ist, dass private Unternehmer einer Genehmigung durch den zuständigen Staat beziehungsweise seiner Behörden bedürfen, bevor sie solche Aktivitäten aufnehmen können. Auch zur Aufsicht über private Aktivitäten sind die jeweiligen Staaten verpflichtet.

Wenngleich bestimmte Rechte und Pflichten privater Unternehmen – zum Beispiel bei Nutzung einer staatlichen Startanlage – auch durch vertragliche Vereinbarungen abgedeckt werden kön- ▷

EUROPEAN SPACE IMAGING

Hamburg, vom Weltraum aus aufgenommen: Der Satellit Ikonos des US-Unternehmens Space Imaging bildet noch Details von einem Meter Größe ab.

▷ nen, gehen mehr und mehr Staaten dazu über, ausführliche gesetzliche Bestimmungen für private Weltraumaktivitäten in Form von nationalen Gesetzen zu erlassen. Diese konkretisieren die völkerrechtliche Genehmigungspflicht und bestimmen die Voraussetzungen für die Genehmigung beziehungsweise Lizenzierung privater Weltraumaktivitäten. Sie umfassen zum Beispiel Regelungen zu Haftpflichtversicherung und zu technischen und persönlichen Voraussetzungen für die Durchführung solcher Aktivitäten. Derzeit bestehen solche besonderen Gesetze in Australien, Brasilien, Großbritannien, Hongkong (China), Russland, Norwegen, Schweden, Südafrika sowie in der Ukraine und in den USA. Auch für Deutschland werden ausführlichere Regelungen immer notwendiger.

Insbesondere jedoch diejenigen Staaten, die über Raketenstartanlagen verfügen, sichern sich durch eine solche Gesetzgebung auch haftungsrechtlich ab: Für Schäden muss nämlich nach dem Völkerrecht derjenige Staat aufkommen, von dessen Territorium oder Anlagen ein Fahrzeug oder Gegenstand ins All gestartet wird oder von dem anderweitig der Start eines Gegenstandes in den Weltraum ausgeht. Sind mehrere Staaten beteiligt, so ermöglicht das völkerrechtliche Prinzip des Opferschutzes, sie alle wegen Schadensersatz in Anspruch zu nehmen. Bestehende nationale Weltraumgesetze sehen daher für den Haftungsfall auch eine Mitversicherung des Staates durch eine Haftpflichtversicherung beziehungsweise Regressansprüche des Staates gegen eventuelle private Verursacher vor.

Da alle Raumfahrzeuge auf Funkverbindungen angewiesen sind und Satelliten zudem je nach Aufgabe bestimmte Umlaufbahnen einnehmen müssen, kommt der Zuteilung von Sendefrequenzen und Orbitalpositionen besondere Bedeutung zu. Für Telekommunikationssatelliten ist noch immer eine Position in der geostationären Umlaufbahn besonders begehrt: In einer Höhe von rund 36 000 Kilometern über dem Äquator umkreisen sie die Erde synchron zu deren Drehung, wodurch ein immer gleicher und zudem weiträumiger Bereich der Erdoberfläche bedient werden kann.

Frequenzen für Papier-Satelliten

Die technische Koordination der Funkfrequenzen erfolgt durch die Internationale Fernmeldeunion (International Telecommunication Union, ITU). Diese Sonderorganisation der Vereinten Nationen mit Sitz in Genf weist zunächst bestimmten Nutzungsarten spezifische Frequenzbereiche zu. Die eigentliche Zuteilung einer Frequenznutzung an einzelne Unternehmen erfolgt jedoch durch die Staaten selbst: Sie melden die konkrete Nutzung bei der ITU an und vergeben Lizenzen an die Betreiber. Grundsätzlich wird die internationale Koordination einzelner Nutzungen nach dem Prinzip »wer zuerst kommt, mahlt zuerst« vorgenommen. Dieses Verfahren führt allerdings dazu, dass Zuweisungen auch für Satelliten beantragt werden, die bis dahin lediglich auf dem Papier stehen (so genannte *paper satellites*). Deswegen ist die ITU inzwischen dazu übergegangen, die Anmeldeverfahren mit Gebühren zu belegen. Außerdem wurde die Frist verkürzt, bis zu der ein Satellit tatsächlich im All positioniert sein muss; ansonsten verfällt die Nutzungsberechtigung.

Wegen des unausweichlichen Verteilungskampfes wird immer wieder geltend gemacht, die Weltraumwissenschaft und Dienste der öffentlichen Versorgung sollten bei der Frequenzzuweisung besonders privilegiert werden – bisher jedoch ohne Erfolg. Für die besonders begehrten Plätze in der geostationären Umlaufbahn besteht allerdings ein besonderes Planungsverfahren für Direktrundfunksatelliten und für Kommunikationsdienste an feste Bodenstationen. Dieses soll sicherstellen, dass allen Staaten die Nutzung des Weltraums in diesen Bereichen gewährt werden kann.

Das von der ITU angewandte Koordinationsverfahren ist darauf angelegt, dass der Anmeldestaat die Frequenzen auch selbst nutzt. Das Verfahren zeigt Schwächen, wenn – wie im Fall des Inselstaates Tonga geschehen – die angemeldeten Frequenzen und Positionen kurzerhand an Betreiber aus anderen

Staaaten verkauft werden. Kritisch zu bewerten sind auch die Versuche von Privatunternehmen, sich die Nutzung bestimmter Umlaufbahnen patentieren zu lassen. Entsprechende Patente konnten zwar in den USA erreicht werden, stießen jedoch in anderen Staaten auf heftigen Widerspruch. Denn andere Betreiber hätten dann unter Umständen keinen freien Zugang mehr zu bestimmten Orbitalbereichen.

Besonderheiten bei Satellitenbildern

Aus dem Weltraum gewonnene Bilddaten werden inzwischen für die unterschiedlichsten kommerziellen Zwecke verwendet: für die Landwirtschaft ebenso wie für das Katastrophenmanagement, die Überwachung zur Einhaltung von Umweltbestimmungen und anderen Vorschriften sowie für das Versicherungswesen und in den Medien. Satellitenaufnahmen, auf denen sich Einzelheiten von weniger als einem Meter Größe erkennen lassen, waren lange Zeit den wenigen Staaten vorbehalten, die über entsprechende militärische Aufklärungstechnologie verfügten. Wegen des kommerziellen und zivilen Bedarfs bieten mittlerweile auch Privatunternehmen derart hoch aufgelöste Aufnahmen an. Die meisten privaten Betreiber solcher Fernerkundungssatelliten sind in den USA zugelassen. Wegen der sicherheitspolitischen Brisanz des Bildmaterials stehen sie unter ständiger staatlicher Kontrolle. Es kann deshalb durchaus vorkommen, dass die Aufnahme bestimmter Bilder oder ihre Weitergabe untersagt wird. Ein ähnliches Verfahren führte auch Indien ein, das damit ebenfalls sicherstellen will, dass sensibles Bildmaterial nicht weitergegeben wird. Während des Afghanistankrieges verwendete die US-Regierung allerdings zivilrechtliche Mittel, um die Weitergabe von Aufnahmen des Ikonos-Satelliten der Firma Space Imaging an Dritte zu verhindern: Die Rechte an den Aufnahmen über Afghanistan wurden vollständig aufgekauft; nach den vertraglichen Vereinbarungen war eine Weitergabe an andere Kunden nur mit gesonderter Genehmigung der US-Regierung möglich. ◁

Susanne U. Reif ist Rechtsanwältin. Sie koordinierte ein Projekt des Instituts für Luft- und Weltraumrecht der Universität zu Köln und des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt zur Weiterentwicklung des Rechts der kommerziellen Weltraumnutzung.

MEDIZIN

Hormon-Irrweg verlassen

Die Hormonersatztherapie in den Wechseljahren war lange Zeit eines der Lieblingskinder der Medizin. Seit erstem November mahnen neue Richtlinien Pharmaindustrie und Ärzte zur Zurückhaltung.

Von Antje Kahlheber

Wahrheit in der Medizin ist nur so alt wie die jüngste Studie. Und auch dann braucht es seine Zeit, bis Erkenntnisse Eingang in die Praxis finden. Propagiert als Jungbrunnen für die Frau in den Wechseljahren, bedauerten Ärzte noch kürzlich, dass nicht alle Frauen einer Hormontherapie zustimmten. Nun wissen sie: Die gesundheitlichen Risiken überwiegen den Nutzen bei weitem.

Jenseits der vierzig nimmt beinahe jede zweite deutsche Frau Hormonpräparate ein; zwei Drittel von ihnen gegen Beschwerden in den Wechseljahren. Vom Beginn unregelmäßiger Blutungen an bis zum Erliegen der zyklischen Eierstockfunktionen kann die nachlassende Hormonproduktion mit vegetativen Symptomen wie Hitzewallungen, aber auch psychischen und somatischen Beschwerden einhergehen. Manche betroffene Frau empfindet ihre Lebensqualität als stark eingeschränkt. In den letzten 15 Jahren verzehnfachte sich die Zahl hormonhaltiger Ersatzpräparate, die einige dieser Symptome lindern. Auch einen bremsenden Einfluss von Östrogen auf die Geschwindigkeit des altersbedingten Knochenabbaus konnte die Wissenschaft in den 1980er Jahren belegen. Weltweit empfahlen Ärzte folglich die Hormontherapie zur Vorbeugung der Osteo- ▷

WICHTIGE ONLINE-ADRESSEN

» **Dipl.-Ing. Runald Meyer VDI**
Entwicklung, Konstruktion,
Technische Berechnung
Strömungsmechanik
www.etastern.de

» **DOK –**
Düsseldorfer Optik-Kontor
Kontaktlinsen online bestellen
www.dok.de

» **Forschungszentrum Jülich**
Brennstoffzellen
Technologie, Jobs,
Dissertationen, Diplomarbeiten
www.fuelcells.de/jobs

» **Forum MedizinTechnik**
und Pharma in Bayern e. V.
Innovationen für die Medizin
www.forum-medtech-pharma.de

» **Kernmechanik –**
die neue Quantenphysik
alle Kerne, alle Kräfte und Kosmologie
www.kernmechanik.de

» **PAN-TEXT® Übersetzungen GmbH**
Kompetente Fachübersetzungen, DTP
Industrie – Technik – Medizin – Verträge etc.
www.pantext.com

Hier können Sie den Leserinnen und Lesern von Spektrum der Wissenschaft Ihre WWW-Adresse mitteilen. Für € 80,00 pro Monat (zzgl. MwSt.) erhalten Sie einen maximal fünfzeiligen Eintrag, der zusätzlich auf der Internetseite von Spektrum der Wissenschaft erscheint. Mehr Informationen dazu von

GWP media-marketing
Mareike Grigo
Telefon (02 11) 887-23 94
E-Mail: m.grigo@vhb.de

▷ porose. Zusätzlich vermuteten viele Mediziner, Hormone könnten vor Gefäßerkrankungen und sogar vor Altersdemenz schützen. Klinische Studien fehlten aber.

Im selben Zeitraum mehrten sich Hinweise auf einen Zusammenhang zwischen der Entstehung von Brustkrebs und der Einnahme von Östrogenen. Doch erst als im vergangenen Jahr die amerikanische Frauengesundheitsinitiative (WHI) eine Langzeitstudie abbrach, rückte das Thema Hormonersatztherapie in das Interesse der Öffentlichkeit. Der Hauptbestandteil einer solchen Therapie ist Östrogen. Für sich allein und ohne Unterbrechung eingenommen, verursacht es Zellteilungen im Uterus, die häufig zu Gebärmutterkrebs führen. Deshalb werden meist Kombinationspräparate mit Gestagen verordnet, das die Wirkung des Östrogens im Uterus blockiert.

Erschreckende Zahlen

Von 16 600 gesunden Frauen, die an der WHI-Studie teilnahmen, wurde die Hälfte mit dem Gestagen-Östrogen-Präparat »Prembro« behandelt, die andere Hälfte bekam Placebos. Nach fünf Jahren musste die Studie jedoch gestoppt werden. Im Vergleich zur Kontrollgruppe war bei den hormonbehandelten Patientinnen die Zahl schwerer Erkrankungen signifikant gestiegen. Es kam unter 10 000 Frauen zu 18 Thrombosen, acht Brustkrebserkrankungen, acht Schlaganfällen sowie sieben Herzinfarkten zusätzlich. Positiv wirkten sich die Hormone auf Darmkrebs und Osteoporose aus: Fünf Frauen weniger erlitten einen Oberschenkelhalsbruch und sechs weniger erkrankten an Darmkrebs.

Schnell wurde Kritik an der Studie laut. Besonders Fachgesellschaften und industrienahe Gynäkologen versuchten, die Ergebnisse der Studie zu verharmlosen. Auf Grund der Präparatwahl seien die Ergebnisse nicht auf andere Formen der Hormonersatztherapie übertragbar, hieß es. Erst die im vergangenen August veröffentlichte britische »Million Women«-Studie entkräftete dieses Argument endgültig. Durch Befragung von über einer Million Frauen im Alter von 50 bis 64 Jahren, die zwischen 1996 und 2001 an einem Screening-Programm teilnahmen, untersuchten Wissenschaftler den Einfluss verschiedener Hormonpräparate auf das Brustkrebsrisiko. Es erkrankten noch mehr Frauen, als bei der WHI-Studie, vor allem Anwenderinnen von Östrogen-Gestagen-Präparaten. Auch Darreichungsform und Dosierungshöhe konnten das erhöhte Risiko nicht mildern.

Ohne Hormontherapie droht etwa 32 von 1000 Frauen zwischen dem 50. und 70. Lebensjahr eine Brustkrebs-Diagnose. In zehn Jahren kommt es unter Hormontherapie zu 19 zusätzlichen Krebsfällen. Das Risiko steigt schon zu Beginn und wächst mit Dauer der Einnahme um zehn Prozent jährlich. Entgegen früheren Annahmen werden Tumoren unter Östrogenbehandlung durch das hormonbedingt dichtere Brustdrüsengewebe erst später entdeckt. Sie haben zu diesem Zeitpunkt schon häufig Metastasen gebildet. Deshalb sinken durch eine Hormonersatztherapie auch die Heilungschancen. Etwa fünf Jahre nach Absetzen der Therapie scheint das Brustkrebsrisiko wieder ein altersgemäßes Niveau zu erreichen.

In Deutschland nahmen im vergangenen Jahr 4,5 Millionen Frauen Hormonersatzpräparate ein. Laut einer Befragung aus dem Jahr 2001 wendete jede dritte Konsumentin das Präparat länger als fünf Jahre an. Nach diesem Zeitraum ist die Gefahr von Krebserkrankungen bereits erheblich erhöht. Sozialmedizinern zufolge sind bis zu 8000 Brustkrebserkrankungen jährlich auf Hormonersatzpräparate zurückzuführen.

Das Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte führt nun eine Neubewertung dieser Präparate durch. Seit dem 1. November 2003 müssen die Produktinformationen erweiterte Angaben zu gesundheitlichen Risiken enthalten. Ärzte sind angehalten, Hormonersatzpräparate nur bei besonders schweren Fällen von Wechseljahrsbeschwerden und dann nur kurzzeitig zu verordnen. Eine jahrelange Einnahme von Hormonen zur Vorbeugung von Osteoporose soll nicht mehr stattfinden. Doch offenbar mangelt es vielen Ärzten an Information oder Einsicht. Immer noch bekennen sich Fachärzte dazu, die Hormonersatztherapie wie bisher fortführen zu wollen. Zusätzlich erbrachte eine aktuelle Umfrage des Forsa-Institutes, dass jede zweite Frau, die schon einmal wegen Wechseljahrsbeschwerden Hormone eingenommen hatte, vom Arzt weder über die Dauer noch über die Risiken der Behandlung informiert wurde.

Gesund durch die Wechseljahre

Wirksamkeit und Risiken pflanzlicher Hormonpräparate sind noch nicht ausreichend erforscht. Bei einigen ist die Wirksamkeit zweifelhaft. Andererseits scheint die Traubensilberkerze (*Cimicifuga*) wie Östrogen zu wirken und Hitzewallungen und Stimmungsprobleme günstig zu beeinflussen. Ob sie aber auch die kanzerogenen Eigenschaften des Östrogens besitzt, ist unbekannt.

Vielleicht sollten die Frauen nach der Hormoneuphorie des vergangenen Jahrzehnts wieder zu alten Weisheiten zurückkehren. Dass die persönliche Einstellung zum Alter mitbestimmt, wie die Menopause empfunden wird, zeigen Kulturen, die dem Jugend- und Schönheitskult weniger anhängen. Dort genießen viele Frauen das Alter als eine Zeit, in der sie wegen ihrer Lebenserfahrung besondere Achtung genießen. Sie klagen nur selten über die Wechseljahre. Nicht rauchen, viel Bewegung und gesunde kalziumreiche Ernährung sind weitere sinnvolle Empfehlungen zur Besserung des Befindens in der Wechselzeit – und zur Prävention von Osteoporose.

Antje Kahlheber ist Biologin und Wissenschaftsjournalistin in Mainz. ◁

PHILOSOPHIE

Gunter Dueck

Omnisophie

Über richtige, wahre und natürliche Menschen

Springer, Berlin 2003. 439 Seiten, € 34,95

Was ist der Mensch? Und was soll er tun? An Antworten auf diese philosophischen Grundfragen ist beileibe kein Mangel. Berühmte Geistesgrößen haben seit Jahrtausenden viele kluge Sätze dazu verfasst. Und jetzt kommt ein kleiner Mathematikprofessor (1,69 Meter nach eigener Angabe), der inzwischen als Manager bei IBM arbeitet, und will allen Ernstes etwas Neues dazu beitragen?

Gunter Dueck gelingt, was zunächst wie schiere Anmaßung anmutet. Und den Anschein der Anmaßung lässt er gar nicht erst aufkommen, indem er dem Leser in einem 400 Seiten langen, ausschweifenden Gespräch ein sehr buntes und sehr persönliches Bild von sich selbst preisgibt – nichts von einem entrückten Weisen auf dem Thron der Erkenntnis.

Als Junge versuchte der Autor, über ein Pferd zu pinkeln.

Duecks neuer Denkansatz, der seinen berühmten philosophischen Vorgängern nicht zu Gebote stand, ist der Computer als Metapher für den Menschen. Das Gedächtnis als Festplatte mit einer übersichtlichen Dateistruktur, wohlsortierten, abrufbaren Informationen, das Gehirn als Prozessor, der vorgefertigte Programme ausführt und damit zu richtigen Ergebnissen kommt – diese naive Vorstellung greift Dueck auch auf; aber für ihn ist dieser innere PC nur ein Teil des Menschen, derjenige, den heutige Neurowissenschaftler gerne in der linken Hirnhälfte ansiedeln.

Ein anderer Teil, vielleicht die rechte Hirnhälfte, ist organisiert wie ein »neuronales Netz«. Das leuchtet ein: Nachdem die Informatiker diese künstliche Struktur der Anatomie des echten Gehirns nachempfunden haben, wird das echte Gehirn vielleicht auch einige ihrer Eigenschaften zeigen. Ein neuronales Netz ist lernfähig, das heißt, es ändert unter dem Einfluss von Erfahrungen gewisse Stellgrößen (»Gewichte«) in seinem Innern so, dass es am Ende ein neues Erlebnis beurteilen kann: »Das ist eine reife Frucht«, »das ist ein vertrauenswürdiger Mensch«. Im Gegensatz zum Expertensystem in der anderen Hirnhälfte kann ein neuronales Netz seine Urteile nicht begründen. Selbst eine sorgfältige Inspektion aller Gewichte würde nicht erklären, wie es zu seinen Schlüssen kommt. Plötzlich habe ich eine Erkenntnis oder eine feste Überzeugung und kann beim besten Willen nicht sagen, wie sie zu Stande gekommen ist.

Die dritte Komponente des menschlichen Geistes entstammt nicht der Literatur, sondern Duecks eigener wissenschaftlicher Arbeit. Sie besteht aus sehr vielen Elementen, die er »Flash-Mode-Sensoren« oder »Seismographen« nennt. Man soll sie sich als winzige Unterprogramme vorstellen, die ständig im Arbeitsspeicher stecken, ihn wegen ihrer Kleinheit nicht sonderlich belasten und in der Regel nichts tun – es sei denn, es kommt ein Input, auf den der Sensor geeicht ist. Dann, und nur dann, schlägt er Alarm; das kann sich in einem Angstausbruch, einem Adrenalinstoß oder auch nur in Erregung von Aufmerksamkeit äußern. Ein solcher Sensor entsteht durch einschneidende Erlebnisse, insbesondere durch einschneidende Erziehungsmaßnahmen. Sein Output erzeugt die Gefühle, die weitgehend unser Handeln lenken – auf den Pfad der Tugend oder vielmehr der angstvollen Anpassung, wenn wir, zum Beispiel durch Erziehung, entsprechend konditioniert sind. Vor allem aber sind unsere eigenen Sensoren uns in der Regel unbewusst; so erzeugen sie unsere Vorlieben, Abneigungen und Vorurteile, ohne dass wir es merken.

Zu den verschiedenen Computern in unserem Kopf gehören verschiedene Menschentypen. Diejenigen, die vorwiegend mit ihrem PC denken, nennt Dueck richtige Menschen, die mit dem neuronalen Netz die wahren Menschen. Dann wären die natürlichen Menschen diejenigen, die nur ihrem vorbewussten Sensorensystem folgen? Nicht ganz. Nach Dueck sind es diejenigen, die vor allem ihrem eigenen Willen folgen – wie er selbst als Kind: Der Autor spart nicht mit drastischen Beispielen, und die Geschichte mit dem Pferd ist eines der harmloseren.

Überhaupt versteht er es, seine Typeneinteilung der Menschen mit den buntesten Erzählungen zu erläutern, was sein Buch ausgesprochen kurzweilig macht. Die positiv gefärbten Bezeichnungen »richtig«, »wahr« und »natürlich« sind mit Bedacht gewählt; Dueck liebt die Menschen alle, auch wenn er selbst sich als wahrer Mensch outet und die gegenwärtige Dominanz des richtigen Denkens als höchst problematisch darstellt.

In der Gesellschaft allgemein, und besonders in der Schule und im Arbeitsleben, wird das Ideal des richtigen Menschen hochgehalten und durch Einpflanzen entsprechender Flash-Mode-Sensoren befestigt, um den Preis, dass den wahren und den natürlichen Menschen wenig anderes übrig bleibt, als ihr Wesen zu verleugnen oder zu unterdrücken. Weil die Philosophen die Frage »Was soll der Mensch tun?« allgemeingültig beantworten wollen, statt die Verschiedenheit der Menschen anzuerkennen, kommt bei dem ganzen Nachdenken nur Belangloses und/oder Unpraktikables heraus: »Tugend sei das höchste Ziel des Menschen.«

Die Übermacht der richtigen Menschen ist allerdings bedroht. Ihre Stärken sind nämlich genau diejenigen, in denen ihnen der Computer zunehmend den Rang abläuft. Was Wunder: Die richtigen Menschen haben den Computer nach ihrem Bilde geschaffen, und nun wächst er ihnen über den Kopf. Hier knüpft Dueck an seine Bücher »Wild Duck« und »E-Man« an (Spektrum der Wissenschaft 11/2000, S. 101 und 9/2002, S. 114) und wagt die Prognose, dass die Richtigen ihre Führungsrolle in naher Zukunft an die Wahren werden abtreten müssen.

Das Pferd nahm es übel, als der Druck nachließ.

Mit der Typeneinteilung – die Dueck noch erheblich verfeinert – ist das so eine Sache. Ich bin bereit, »richtig«, »wahr« und »natürlich« als eine Art von Koordinatensystem zu akzeptieren. Jeder Mensch ist eine Mischung aus diesen drei »Reinformen«, und deren Studium hilft, mich und andere zu verstehen – was Dueck eindrucksvoll nachweist. Aber er geht darüber hinaus, indem er behauptet, im Prinzip sei jeder Mensch

einer der Reinformen zuzuordnen, und das sei auch gar nicht schwer herauszufinden: Eine dreiminütige Selbstdarstellung genüge. Dass regelmäßig eine der Komponenten dominiere, sei auch nicht weiter verwunderlich: Ein Mischtyp habe es eben viel schwerer im Leben, weil er die inneren Konflikte zwischen seinen verschiedenen Komponenten mühsam in jedem Einzelfall lösen müsse.

Das klingt mir zu sehr nach Schubladendenken. Mit diesem Einwand gehöre ich in die Kategorie »wahrer Mensch«, Unterkategorie »Pfarrer und Menschenversteher«; denn Dueck kann die Menschen bereits nach den Einwänden, die sie gegen seine Philosophie äußern, in Schubladen einteilen. Aber das stört nicht besonders. Der wahre Mensch Dueck bietet so viele originelle und unkonventionelle Gedanken, dass dieses kleine Abgleiten in eine Unart der Richtigen nicht ins Gewicht fällt.

Christoph Pöppe

Der Rezensent ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

MIKROBIOLOGIE

France Bourély

Unsichtbare Welten

Von der Schönheit des Mikrokosmos

Aus dem Französischen von Eva Plorin und Alexandra Brehme.
Gerstenberg, Hildesheim 2002.
216 Seiten, € 49,90

MIKRO- UND MAKROKOSMOS

Amanda Renshaw (Hg.), Katherine Roucoux (Texte)

Himmel & Erde

Verborgene Welten

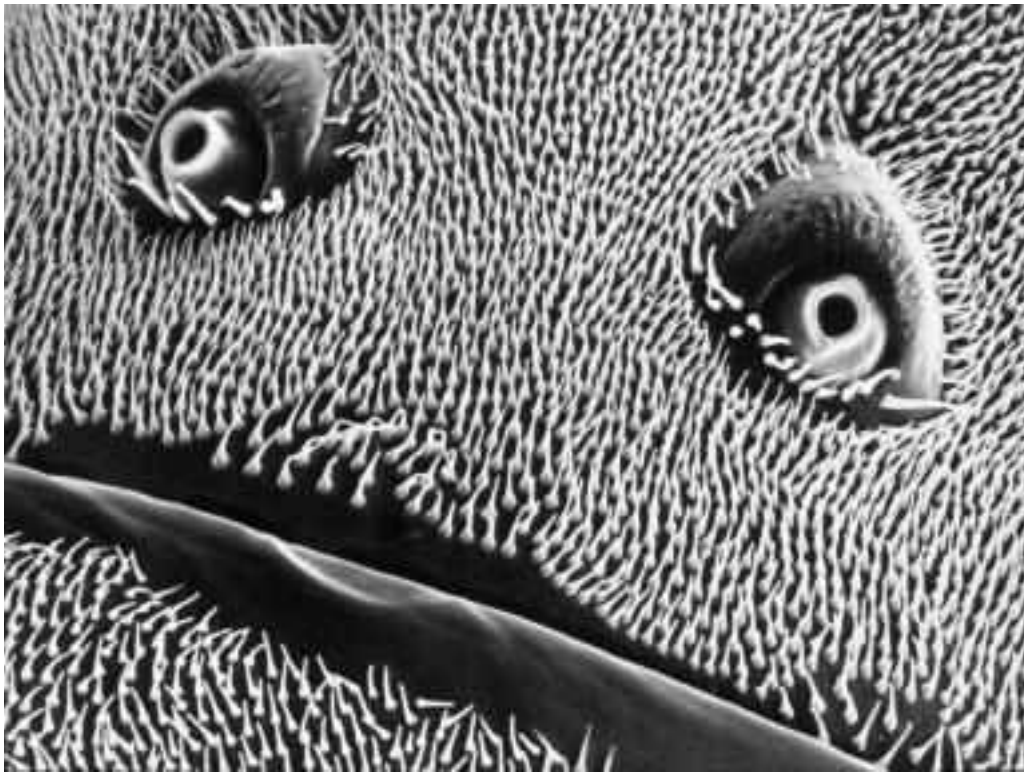
Aus dem Englischen von Sebastian Vogel und Susanne Kuhlmann-Krieg.
Phaidon, Berlin 2002. 400 Seiten, € 49,95

Die Bilder von »Unsichtbare Welten« sind einfach wunderschön. Die promovierte Pharmazeutin France Bourély ist eine begnadete Künstlerin des Rasterelektronenmikroskops. Es gelingt ihr, den Kopf einer Baumwanze, ein Detail aus deren Hautstruktur oder die Atemöffnung am Hinterleib einer Mücke (Bild rechts) so eindrucksvoll ins Bild zu setzen, dass man alles Mögliche damit assoziiert, nur nicht das, was es wirklich ist. Vorbildlich ist, dass sie die Bilder in edlem Schwarz-Weiß ohne Beiwerk für sich wirken lässt und die technischen Erläuterungen in einen Anhang verschiebt.

Mich persönlich hat nur gestört, dass die Autorin, die sich selbst als »kontemplative Biologin« bezeichnet, zu sämtlichen Bildern ihre eigenen, häufig originellen, manchmal ein bisschen esoterischen Interpretationen in Form von Bildtiteln oder auch Gedichten vorgibt. Ich ziehe es vor, meine Fantasie selbst spielen zu lassen; und die Bilder geben dazu reichlich Gelegenheit.

Die Macher von »Himmel & Erde« haben mit den besten Bildern der be- ▷

Häkchen am Flügel einer Biene (links; Bildtitel »Klettverschluss«) und Atmungsöffnung am Hinterleib einer Mücke (»Das kosmische Lächeln«). Aus »Unsichtbare Welten«



Oben eine etwa 10 Millimeter lange Flügelschnecke aus dem Nordatlantik, in einer Petrischale voll Meerwasser bei Dunkelfeldbeleuchtung fotografiert; rechts Schuppen auf der Haut eines Hais in 200facher Vergrößerung. Aus »Himmel & Erde«

rühmtesten Fotografen wie Lennart Nilsson und David Malin nicht gespart. Roter Faden ist der wachsende Maßstab von »winzig klein« bis »ganz weit weg«, nach dem Vorbild von »Zehn^{Hoch}«, allerdings ist die Umsetzung nicht ganz so gelungen wie dort. Das erste von fünf Kapiteln zeigt mikroskopische Objekte, das zweite ungewöhnliche Blicke auf Gegenstände, die im Prinzip mit bloßem Auge sichtbar sind, das dritte Satellitenaufnahmen der Erde, während die beiden letzten immer tiefer in den Weltraum vordringen.

Hier sind die Beschreibungen zu jedem Bild unentbehrlich, weil eine kontemplative Haltung dem Betrachter nicht weiterhilft. Über den vielen Flussdeltas auf den Satellitenbildern droht das Auge allerdings zu ermüden.

Am besten nutzt man das Buch wie einen Tageskalender: jeden Tag eine Seite weiterblättern. Die Fülle an Prachtbildern ist in einem Rutsch gar nicht zu erfassen.

Alice Krüßmann

Die Rezensentin ist Bildredakteurin bei Spektrum der Wissenschaft.

INFORMATIK

David Harel

Das Affenpuzzle

und weitere bad news aus der Computerwelt

Aus dem Englischen von Markus Junker.
Springer, Berlin 2002. 207 Seiten, € 19,95

Der Physik ist es in vorbildlicher Weise gelungen, ihre Erkenntnisse in die breitere Öffentlichkeit zu transportieren. Sie hatte es leicht bei explosiven Themen wie der Atomtheorie, aber selbst so Schwieriges wie Quantenphysik oder Schwarze Löcher findet sich in populärwissenschaftlichen Werken gut verständlich erklärt. Zur Informatik dagegen gibt es außer der Fachliteratur vor allem Bücher, die uns eine schöne neue Welt versprechen. Das ist nur ein Teil der Wahrheit. Wie in jeder Wissenschaft stehen Errungenschaften, die uns das Leben erleichtern, solchen von eher zweifelhaftem Wert gegenüber. Und es gibt Grenzen des Machbaren und des mit den vorhandenen Ressourcen Machbaren.

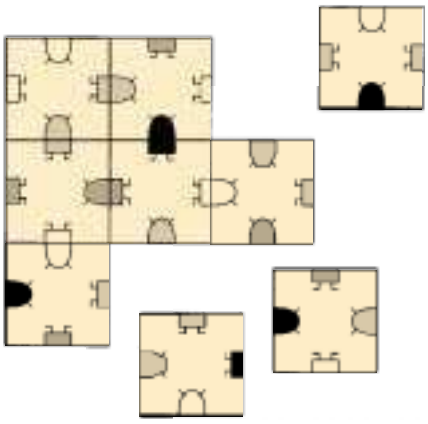
Diese Grenzen sind das Thema des Buches von David Harel vom weltberühmten Weizmann-Institut in Rehovot (Israel). Der englische Titel »Computers Ltd.: what they really can't do« gibt sein Anliegen viel deutlicher wieder als der deutsche (insgesamt ist die Übersetzung aber gut gelungen). Was also können Rechner nicht nur »noch nicht«, sondern prinzipiell nicht? Können wir derartig weit reichende Resultate auch im mathematischen Sinn beweisen? Wir können – und das ergibt ein faszinierendes Forschungsgebiet, die Komplexitätstheorie und die Berechenbarkeitstheorie.

Natürlich müssen die Fragen präzisiert werden. Könnte ein Rechner eingesetzt werden, um aus einer Gerichtsverhandlung ein Urteil zu berechnen? Schon, aber die Auswirkungen wären vermutlich schlimm. Darum geht es in diesem Buch nicht. Rechner können bis-

▷ her nur schlecht Texte in eine andere Sprache übersetzen. Auch darum geht es nicht, weil wir nur schwer richtige von falschen Ergebnissen abgrenzen können.

Was bleibt dann? Sehr viel: alle Optimierungsprobleme aus den Natur- und Ingenieurwissenschaften und dem Alltag mit einem gut überprüfbaren Optimierungsziel, aber auch Fragen über die Lösbarkeit von Problemen oder die Korrektheit von Lösungsverfahren. Zudem sind wir an allgemeinen Problemen interessiert. Also nicht am kürzesten Weg von Dortmund nach Moskau, auch nicht an der kürzesten Verbindung zwischen zwei beliebigen Städten auf unserem Erdball, sondern an einem Verfahren, das zu einer Liste von beliebig, aber endlich vielen Orten und Verbindungen (mit Längenangaben) zwischen einigen Orten kürzeste Wege findet. Dies ist keine Einschränkung, da Rechnerlösungen von dieser allgemeinen Art sind.

Rechner können nicht alle von uns zugelassenen Probleme lösen, weil es viel mehr (allgemeine) Probleme als Lösungsverfahren gibt. Dies kann man beweisen, aber so geht das Buch nicht vor. Harel betrachtet stets konkrete Probleme. Er diskutiert keine mathematischen Beweise, sodass das Buch gut verständlich bleibt; stattdessen begründet er seine Behauptungen eindringlich, überzeugend und mit einer bildhaften Sprache.



Das Affenpuzzle: Aus diesen Kärtchen ist ein 3×3-Quadrat zu legen, bei dem an jeder Schnittstelle ein vollständiger und einfarbiger Affe entsteht. Der Aufwand für das Durchprobieren aller Möglichkeiten steigt mit der Problemgröße (Anzahl der Kärtchen) exponentiell an; eine wesentlich bessere Strategie ist nicht bekannt.

Eine solche Behauptung ist: Es gibt keinen Algorithmus, der für ein beliebiges Computerprogramm, das auf Listen von Zahlen operiert, entscheidet, ob es jede Zahlenliste aufsteigend sortiert. Wohlgemerkt: Für viele Programme können wir dies nachweisen, aber nicht allgemein.

Andere Probleme sind prinzipiell lösbar, aber so schwer, dass die Ressourcen unseres Universums nicht ausreichen, sie zu lösen.

Noch faszinierender ist die Frage, die unter dem Namen »P=NP?« berühmt geworden ist. Tausende von Problemen, darunter viele der täglich zu lösenden Optimierungsprobleme, gehören zu der Problemklasse NP. Wir wissen nicht, ob

Ist eine vorgelegte Zahl eine Primzahl? Diese Frage ist effizient lösbar.

sie effizient (mit realistischen Ressourcen) lösbar sind oder nicht. Wir wissen aber, dass sie alle effizient lösbar sind oder alle nicht effizient lösbar sind. Das Buch stellt anschaulich dar, wie derartige Ergebnisse erzielt werden. Die Fachwelt ist sich einig, dass auch hier die schlechte Nachricht »nicht effizient lösbar« wahr ist.

Aber sind schlechte Botschaften nur schlecht? Kryptografie, die Verschlüsselung von Daten, beruht ja gerade darauf, dass legale Nutzer einen Vorteil gegenüber illegalen haben. Moderne Kryptosysteme sind prinzipiell knackbar – nur hat niemand die dafür nötigen Ressourcen.

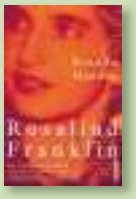
Das Buch ist von einem weltbekannten Experten in einem unvergleichbaren Stil geschrieben: leicht und locker und dennoch präzise. Notwendige Vereinfachungen führen nicht zu nur noch fast richtigen Aussagen. Wer abstrakte Gedanken nicht fürchtet, wird dieses Buch mit Genuss lesen und hinterher die Informatik mit anderen Augen sehen.

Eine kleine Ergänzung: David Harel wählt häufig den Test, ob eine Zahl Primzahl ist, als Beispiel. Im vergangenen Jahr haben Manindra Agrawal, Neeraj Kayal und Nitin Saxena aus Kanpur gezeigt, dass dieses Problem effizient lösbar ist – es gibt also auch gute Nachrichten.

Ingo Wegener

Der Rezensent ist Professor für Komplexitätstheorie und effiziente Algorithmen an der Universität Dortmund.

Die 5x5-Rezension des Monats von wissenschaft-online



Brenda Maddox
Rosalind Franklin
Die Entdeckung der DNA oder der Kampf einer Frau um wissenschaftliche Anerkennung
Campus, Frankfurt am Main 2003, 300 Seiten, € 24,90

Der Name Rosalind Franklin ist bei weitem nicht so bekannt wie etwa diejenigen der Nobelpreisträger James Watson und Francis Crick. Dabei waren es die Aufnahmen der international anerkannten Röntgenkristallografin, die wohl den entscheidenden Hinweis auf den Aufbau des Erbmoleküls Desoxyribonukleinsäure gaben. Gerade dem Leben dieser Frau im Hintergrund hat nun Brenda Maddox ihr Buch gewidmet. Das Ergebnis ist eine außergewöhnlich klare und weitsichtige Biografie über eine brillante Wissenschaftlerin und eigenwillige Persönlichkeit – wohltuend distanziert von den Grabenkämpfen rund um die spektakuläre Entdeckung der DNA-Struktur.

Aus der Rezension von Stephanie Hanel

5x5 Rubriken	Punkte 1 • 2 • 3 • 4 • 5
Inhalt	■■■■■
Didaktik	■■■■■
Suchen/Finden	■■■■
Lesespaß	■■■■■
Preis/Leistung	■■■■
Gesamtpunktzahl	23

Den kompletten Text und zahlreiche weitere Rezensionen von wissenschaft-online finden Sie im Internet unter
http://www.wissenschaft-online.de/5x5

MATHEMATIK

Ian Stewart

Das Rätsel der Schneeflocke

Die Mathematik der Natur

Aus dem Englischen von Andrea Kamphuis, Brigitte Post, Regina Schneider und Sebastian Vogel.
Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2002. 224 Seiten, € 29,95

Schneeflocken haben, unter der Lupe betrachtet, eine filigrane, baumartig verzweigte Struktur von großer Regelmäßigkeit – sechszählig dreh- und spiegelsymmetrisch – und zugleich enormem Formenreichtum: Keine zwei Flocken scheinen sich zu gleichen. Wie lässt sich diese rätselhafte Kombination von Eigenschaften erklären?

Diese Frage nimmt Ian Stewart zum Anlass, einen viel größeren Bogen zu spannen. Schneeflocken sind Paradebeispiele, die viele wichtige Phänomene der natürlichen Strukturbildung zeigen: Symmetrie und Symmetriebrechung, Bifurkationen, Phasenübergänge, Komplexität, Chaos und fraktale Geometrie.

Etwa die Symmetrie der Blüten: Eine winzige chemische Änderung, die Methylierung eines Gens, macht den Unterschied zwischen der fünfzählig drehsymmetrischen und der nur spiegelsymmetrischen Variante aus. Auch anderswo können winzige Abweichungen in den Ursachen gewaltige Folgen haben, wie bei Wasser, das plötzlich gefriert, wenn die Temperatur den Nullpunkt unterschreitet, oder in der Evolutionsbiologie, wo kleine Veränderungen der Umweltbedingungen zur Aufspaltung von Arten führen können. Man sagt, das System durchläuft einen Phasenübergang oder eine Bifurkation (Verzweigung).

Solche Phänomene wirken noch ordentlich und vorhersagbar. Wenn man dagegen Eiweiß schlägt, beschreibt der Schneebesen in der Schüssel zwar einfache Bahnen, aber das Eiweiß wird auf so komplizierte Weise verquirlt, dass die einzelnen Partikel praktisch unvorhersagbare, chaotische Bahnen einschlagen. Auch sehr dicht benachbarte Partikel gehen irgendwann getrennte Wege und landen in ganz unterschiedlichen Regionen der Schüssel. Diese intensive Vermischung der Eiweißpartikel miteinander und mit Luft hat zwei diametral verschiedene Folgen: Die Position eines einzelnen Eiweißpartikels ist nicht vorhersagbar, aber das Gesamtergebnis Eischnee dafür um so mehr.

Dieses Bild eines dynamischen Systems entsteht aus der Koexistenz von sechszähliger Symmetrie und Chaos – wie eine Schneeflocke, obgleich die Ähnlichkeit eher zufällig ist.

Und was hat das alles mit Schneeflocken zu tun? Die Auflösung dieses Rätsels kommt erst ganz am Schluss des Buches, nachdem alle Zutaten dafür schon bereitstehen. Ihre sechszählige Symmetrie hat die Schneeflocke vom Kristallgitter des Wassers geerbt. Physikalische Faktoren wie Temperatur und Übersättigung der Luft mit Wasserdampf legen nun die allgemeine Gestalt der Kristallkeime fest. Bei Temperaturen knapp unter dem Gefrierpunkt und relativ niedriger Übersättigung entstehen hexagonale Plättchen, einfache Sechsecke, deren gerade Kanten beim Wachstum stets gerade bleiben. Bei ansteigender Übersättigung sind nicht mehr alle Punkte entlang der Kante gleichberechtigt, und die Dynamik des Flockenwachstums durchläuft eine Bifurkation. Winzige Unregelmäßigkeiten werden jetzt verstärkt, auf den Kanten wuchern spitze Auswüchse (wobei allerdings nicht klar wird, wieso dabei die sechszählige Symmetrie erhalten bleibt) und auf diesen sekundäre Auswüchse. So kommt es zu fraktalem Wachstum, das farnartige Gebilde entstehen lässt. Und dieser Vergleich ist kein Zufall, denn Farnwedel und viele andere Strukturen im Pflanzen- und Tierreich wachsen gemäß ganz ähnlichen Mechanismen (womit wir wieder ▷

▷ beim Thema wären). Die Formenvielfalt der Schneeflocken kommt nun dadurch zu Stande, dass es im Innern der Wolke, wo sie entstehen, so chaotisch zugeht wie im entstehenden Eischnee.

Spektrum-Leser kennen viele der einzelnen Bausteine des Buchs schon aus den »Mathematischen Unterhaltungen«. Sie sind hier nun, aufgehängt an der zentralen Frage »Wie bekommt die Schneeflocke ihre Form?«, in einem Werk zusammengestellt. Anders als in den »Mathematischen Unterhaltungen« verzichtet Stewart weitgehend auf mathematische Formeln und Begriffe; trotzdem gelingt es ihm, alles hinreichend genau zu erklären. Einige Phänomene wirken dabei allerdings klarer, als sie tatsächlich sind. So ist etwa die Kristallstruktur von Eis – die Grundlage für die Schneeflockengeschichte – in der Physik noch gar nicht abschließend geklärt.

Gut schreiben kann Stewart bekanntermaßen, unterhaltsam und eben doch mathematisch präzise. Alles ist klar und gut lesbar, man hat nicht das Gefühl, dass etwas erklärt wird, eher, dass man etwas erzählt bekommt. Immer wieder kommt der Autor dem nicht mathematisch vorgebildeten Leser entgegen, sei es dass er etwas durch Alltagsbeispiele veranschaulicht, Anekdoten erzählt oder sich für Merkwürdigkeiten des mathematischen Denkens entschuldigt.

Das Buch ist sorgfältig übersetzt und liebevoll bebildert. Ein paar kleine sachliche Fehler haben sich eingeschlichen, und das eine oder andere Argument ist bei näherem Hinschauen nicht vollkommen schlüssig. Aber das ist bei der Breite der behandelten Themen kaum zu vermeiden und schmälert die Qualität dieses Buches in keiner Weise.

Ellen Baake und Dirk Frettlöh

Ellen Baake ist habilitierte theoretische Biologin, Dirk Frettlöh promovierter Mathematiker; beide arbeiten am Institut für Mathematik und Informatik der Universität Greifswald.

LEXIKON

Isidor Fischer

Biographisches Lexikon der hervorragenden Ärzte der letzten fünfzig Jahre

Band 3: Nachträge und Ergänzungen Aba – Kom

Herausgegeben und bearbeitet von Peter Voswinckel.
Olms, Hildesheim 2002. 955 Seiten, € 101,–

Die medizinische Biografik arbeitet so bedächtig, dass ein Standardwerk alle fünfzig Jahre als angemessene Publikationsrate gilt. Auf das fünfbändige »Biographische Lexikon der hervorragenden Ärzte aller Zeiten und Völker« (1884–1888, Neubearbeitung 1929–1934) von August Hirsch folgte 1901 Julius Pagel mit seinem »Biographischen Lexikon hervorragender Ärzte des 19. Jahrhunderts«. Deren Arbeit führte Isidor Fischer mit seinem zweibändigen »Lexikon der hervorragenden Ärzte der letzten fünfzig Jahre« weiter, das 1932/33 erschien. Der 1868 in Wien geborene und dort tätige Gynäkologe und Medizinhistoriker Fischer behandelte als alleiniger Bearbeiter 7800 Mediziner aus der ganzen Welt, wenn auch mit einem deutlichen Schwerpunkt in Westeuropa und den USA. Wegen der rassistischen Anfeindungen des nationalsozialistischen Regimes emigrierte er 1938 nach England, wo er 1943 in Bristol verstarb.

Der renommierte Medizinhistoriker Peter Voswinckel hat es nun unternommen, das Werk Fischers zu einem Abschluss zu bringen. Dieser hatte aus Gründen der Kontinuität nicht nur bereits verstorbene, sondern auch 4400 noch lebende Fachkollegen aufgenommen. Voswinckel ist nun dem Schicksal dieser 4400 Ärzte nachgegangen. Der vorliegende Band enthält die Namen von »Aba« bis »Kom«, ein vierter Band soll den Rest des Alphabets umfassen.

Abgesehen von Angaben wie Name, Berufsbezeichnung, Geburts- und Todesdaten wiederholen die einzelnen Artikel nichts, was schon bei Fischer steht, sondern setzen dessen biografische Artikel einfach fort. In der Tat eine Ergänzung, die ohne das Grundwerk nicht sinnvoll zu nutzen ist. Dies allerdings ist in einschlägigen Bibliotheken zu finden, sodass der Verzicht auf die Wiederholung gerechtfertigt erscheint.

Hans Hirschfeld (1873–1944)

Voswinckel versteht sein Lexikon »als Beitrag zum kollektiven Gedächtnis Europas, zugleich als Anregung und Appell an die heute tätigen Ärzte …, gelegentlich innezuhalten und sich klarzumachen, dass die gemeinsame Geschichte unvorstellbare Verletzungen und Wunden birgt, die zu übersehen fatale Folgen nach sich ziehen muss«. In das Vorwort integriert ist eine nach Städten geordnete Auflistung bei Fischer behandelter Personen, die vertrieben wurden oder Selbstmord begingen wie der Prager Pädiater Rudolf Fischl, der seiner drohenden Deportation 1942 durch den Sprung aus dem Fenster zuvorkam, sowie eine Aufstellung jener dort genannten Ärzte, die während der NS-Herrschaft dem SS-Offizierskorps angehörten. Die erste Liste ist von trauriger Länge, die zweite – immerhin – recht kurz.

Hinter den knapp und nüchtern geschriebenen Lebensläufen verbirgt sich eine immense Recherchetätigkeit, die nur zu erahnen vermag, wer selbst mit der biografischen Forschungspraxis vertraut ist. Hinzu kommt, dass Voswinckel diese Sysiphusarbeit ohne nennenswerte organisatorische und fachliche Unterstützung alleine zu Wege gebracht hat.

Der Sinn dieses Unterfangens – siebzig Jahre danach! – scheint gleichwohl zunächst fraglich. Im Rückblick erscheint mancher der Beschriebenen nicht mehr so hervorragend, dass er einen Eintrag in Fischers Lexikon verdient hätte; die große Bedeutung anderer Ärzte zeigte sich erst nach 1930. Zudem liegt seit 2002 die »Biographische Enzyklopädie deutschsprachiger Mediziner« (K. G. Saur, München)

vor, die unter der Ägide des Kieler Medizinhistorikers Dietrich von Engelhardt erarbeitet wurde. Die 4600 Kurzbiografien in zwei Bänden stellen im Wesentlichen einen Auszug aus der zehnbändigen »Deutschen Biographischen Enzyklopädie« (1995–2000) desselben Verlags dar.

Ich halte die Vorgehensweise Voswinckels für wohlbegründet und sein Werk für einen überzeugenden Beleg dafür. Die Beschränkung auf die Vorgaben Fischers hat systematische Gründe, ist aber auch ein Zeichen des Respekts vor dem Werk und der Persönlichkeit Fischers, dessen Lebenslauf als einziger neu hinzukam. Vor allem liefert Voswinckel den aktuellen Forschungsstand, den man in der »Biographischen Enzyklopädie deutschsprachiger Mediziner« vergeblich sucht – ein Mangel, der wegen der beträchtlichen Verbreitung dieses Werks schwer wiegt.

Die »Biographie« ist überwiegend eine Kompilation bereits gedruckt vorliegender Quellen, die sich in Alter und Korrektheit stark unterscheiden. Manche wichtige Namen fehlen überhaupt, so etwa der Hämatologe Hans Hirschfeld, der 1932/34 ein vierteiliges »Handbuch der allgemeinen Hämatologie« herausgab und von 1916–1938 Herausgeber der international renommierten »Folia Haematologica« war. Hirschfeld verlor seine Ämter und wurde 1944 im KZ Theresienstadt ermordet, aber nicht nur seine persönliche Existenz wurde vernichtet, sondern auch sein Platz in der Medizingeschichte. Als 1957–1969 in der Bundesrepublik eine Neuauflage des »Handbuchs der Hämatologie« erschien, fehlte sein Name als Herausgeber, ebenso wie in den in der DDR weitergeführten »Folia Haematologica«. Kein Nachschlagewerk der Nachkriegszeit verzeichnete Hirschfeld, lediglich in einer 1974 erschienenen »Einführung in die Geschichte der Hämatologie« findet sich der falsche Hinweis, Hirschfeld sei 1929 in Berlin verstorben. Der korrekte Lebenslauf wurde erst von Voswinckel erarbeitet.

»Knaurs Gesundheitslexikon« wurde durchgreifend »arisiert« – bis heute

Ebenso vermisst man in der »Biographischen Enzyklopädie deutschsprachiger Mediziner« einen Artikel über Josef Löbel. Er publizierte 1930 »Knaurs Gesundheitslexikon«, das 2002 seine 50. Auflage erreichte. Auch Löbel wurde wegen seiner jüdischen Abstammung verfemt und nahm sich im von Deutschen besetzten Prag das Leben. Sein Lexikon wurde so durchgreifend »arisiert«, dass sein Name in 49 folgenden Auflagen nicht mehr erschien. Stattdessen traten ein gewisser Peter Hiron und nach dem Krieg ein Peter Grunow als Herausgeber auf. Hinter beiden Pseudonymen verbarg sich der Berliner Polizeiarzt Hubert Volkmann, der auch in anderem Zusammenhang als Autor oder Herausgeber derartig »arisierter« Bücher in Erscheinung getreten ist.

Rudolf Fischl (1862–1942)

Die zwei genannten Beispiele illustrieren eine durchgehende Tendenz der »Enzyklopädie«: das Schicksal von Verfolgten des NS-Regimes, in erster Linie von Juden, zu verschweigen. Es ist das große Verdienst Voswinckels, mit seiner Fortsetzung des Fischer'schen Lexikons dem durch die »Enzyklopädie« genährten Eindruck entgegenzuwirken, hier zu Lande sei die Medizingeschichtsschreibung noch auf dem Stand der Adenauer-Zeit.

Wer sich mit der Medizingeschichte des 20. Jahrhunderts beschäftigt, erhält durch die Arbeit von Peter Voswinckel eine moderne und verlässliche Datenbasis und die deutsche Medizinbiografik ein zeitgemäßes Gesicht. Es bleibt zu hoffen, dass sich Geldgeber finden, damit auch der im Manuskript fertige zweite Teil des Ergänzungswerkes in Druck gehen kann. Käme es anders, wäre dies im doppelten Sinn ein Armutszeugnis für die Kulturnation Deutschland.

Claus Priesner

Der Rezensent ist Redakteur der Neuen Deutschen Biografie in der Historischen Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in München.

BIOLOGIE

Wilhelm Eisenreich, Alfred Handel, Ute E. Zimmer

Der Tier- und Pflanzenführer für unterwegs

(Neuausgabe)

BLV, München 2003. 558 Seiten, € 12,95

Autoren und Verlage versuchen immer noch das Unmögliche. Ein handliches Bändchen soll als Führer durch die Flora und Fauna Mitteleuropas dienen. Inklusive Pilzreich. Immerhin hat sich der Vorgängertitel gut verkauft. Gegen einen Überblick mit schönen Fotos ist auch nichts einzuwenden – wenn er nur als solcher gekennzeichnet wäre. Dann wäre auch die übersichtliche Gestaltung positiv zu vermerken. So aber steht »Schnelles, zweifelsfreies Bestimmen ist noch einfacher« auf dem Umschlag eines Taschenbuchs, in dem einige der häufigsten Arten fehlen. Hier wird dem Laien vorgegaukelt, auf Artniveau bestimmen zu können.

Die Fotos sind ästhetisch ansprechend, doch nicht, wie behauptet, »naturgetreu«. Besonders bei den Schmetterlingen fallen Flügelstellungen auf, die in der Natur nie zu sehen sind, sondern nur am präparierten Exemplar – auch hier wäre ein Hinweis sinnvoll. In den Sonderteilen, die als zusätzliche Bestimmungshilfen deklariert sind, finden sich Duplikate der Fotos aus dem Hauptteil. Den Platz hätte man besser verwenden können.

Ein schönes Bilderbuch – nur mit dem falschen Etikett.

Antje Kahlheber

Die Rezensentin ist Diplombiologin und Wissenschaftsjournalistin in Mainz.

ALLGEMEINWISSEN

Das anarchische Lexikon

Das Wissen der Welt in einem riesenhaften Gemeinschaftsprojekt zu sammeln: Dieses Ideal verfolgt die »Wikipedia« erstaunlich erfolgreich – mit den unvermeidlichen Einschränkungen.

Von Elke Reinecke

Auf den ersten Blick scheint www.wikipedia.org ein Ort der organisierten Unverantwortlichkeit zu sein. Die Texte sehen zwar aus wie Lexikonartikel; aber jeder Nutzer kann sie nach Belieben verändern, umschreiben oder verunstalten. Allgemein heißt ein offenes Projekt dieser Art ein »Wiki« (polynesisch für »schnell«). Kein Beteiligter muss auch nur seinen Namen nennen, und niemand kann ein Recht an dem Ergebnis für sich beanspruchen. Wie soll aus dieser riesengroßen, anonymen Graffiti-Wand eine Enzyklopädie werden?

Der erstaunliche Befund: Es wird. »Wikipedia, the free encyclopedia«, ist seit Januar 2001 online und enthält bereits jetzt mehr als 160 000 (englischsprachige) Artikel. Täglich kommen ungefähr 2000 Änderungen oder Neueinträge dazu. Eine fünfstellige Zahl von Freiwilligen (»Wikipedians«) häuft mehr oder weniger regelmäßig Wissenshäppchen an, dazu eine unbekannte Zahl von Gelegenheitsautoren. Mittlerweile ist die »Wikipedia« im Netz so bekannt und geschätzt, dass ihre Artikel bei der Suchmaschine »Google« häufig auf den vorderen Plätzen landen.

Stellen wir ihr dieselben Fragen wie der »Encyclopædia Britannica« (vergleiche meine Rezension in Spektrum der Wissenschaft 7/2003, S. 95) – schließlich soll das Online-Gesamtopus irgendwann diesem Standardwerk vergleichbar sein.

Schreibe für deine Feinde

Über Joschka Fischer wird man zutreffend und vor allem aktuell bis in die jüngste Vergangenheit informiert. Zu der Harry-Potter-Autorin Joanne K. Rowling gibt es über den zweiten Vornamen hinaus eine Fülle von Informationen und einiges an Klatsch und Tratsch. Kann man dem trauen? Wahrscheinlich ja. Denn das Schreiben und Ergänzen von Artikeln findet unter den Augen der »Öffentlichkeit« statt. Jede Änderung löst eine Meldung unter »Recent changes« aus, und offensichtlich gibt es genügend Wikipedians, die regelmäßig diese Meldungen durchsehen. Sie sind es, die anstelle irgendwelcher Autoritäten die Qualität des Ganzen hochhalten.

Und die Gänse vom Kapitol, die anno dazumal das römische Reich retteten? Fehlanzeige. Dafür hat sich noch niemand erwärmen können. Das zeigt eine Grenze des Projekts: Aufgenommen wird nur, wofür wenigstens ein Mensch bereit ist, seine Zeit aufzuwenden. Am Themenspektrum merkt man, dass die »Wikipedia« überwiegend von Amerikanern geschrieben wird. Nicht englischsprachige Ableger wie der deutsche sind erst später gestartet worden und deswegen noch relativ klein. Und Exotisches aller Art findet hier eine große Spielwiese, von einer lehrbuchreifen Darstellung der eher abseitigen »surreal numbers« bis zu einer Wikipedia auf »plattdüütsch«.

Bei aller Freiheit gibt es ausführlich formulierte Richtlinien. Die wichtigste ist »NPOV« wie »neutral point of view«: Stelle nie eine Meinung als Tatsache dar; dass manche Leute eine Meinung haben, ist eine Tatsache, die du – höflich und mit sympathischer Grundeinstellung – darstellen darfst. »Schreibe für deine Feinde.« Natürlich hilft diese Vorgabe nicht, den »edit war« zwischen Idealisten verschiedener Art zu vermeiden – im Einzelfall ist schon der Unterschied zwischen Tatsache und Meinung strittig. Aber der Krieg wird kanalisiert, in separaten Diskussionsseiten zu jedem Artikel – und überraschend häufig beigelegt. So kommen Glanzstücke zu Stande wie der Artikel über den in den USA heftig diskutierten Kreationismus. In dem Bemühen, allen Seiten gerecht zu werden, geraten solche Werke sehr lang; aber das fällt im Internet nicht unangenehm auf.

Irgendwo im Verborgenen hat auch die hochgehaltene Änderungsfreiheit ihre Grenzen. Allzu hartnäckigen Vandalen wird der Zugang verwehrt, einige Seiten wie die Eingangsseite sind gegen Änderungen gesperrt, und für den äußersten Notfall steht Jim Wales bereit, im Hauptberuf Betreiber einer kleinen Suchmaschine namens »Bomis«, Mitinitiator und bisheriger Finanzier des Projekts. Er ist nach eigener Darstellung der »wohlwollende Diktator« der Wikipedia-Gemeinde, der sich das letzte Wort vorbehält.

»Wikipedia«-Seiten wie diese über den Neuntöter sind stets reichlich mit Links ausgestattet. »Edit this page« (links) lädt zum Verändern der Seite ein.

Die Autorin ist Redakteurin bei Wissenschaft Online in Heidelberg.

WISSEN ZAHLT SICH AUS

Spektrum-Jubiläumspreisrätsel

Diesmal können Sie doppelt gewinnen!

Erstens mit der Lösung des nebenstehenden Rätsels. Tragen Sie in die Kästchen die Buchstaben ein, die Sie unter der entsprechenden Nummer im Kreuzworträtsel gefunden haben.

84	51	21	15	87	62	22	18	49	67	2	20	30	36	88	23	9

Zweitens mit der Gesamtlösung aus den Kreuzworträtseln von September bis November. Tragen Sie Ihre Lösungsbuchstaben in die entsprechenden Felder ein; »a« steht für das Kreuzworträtsel vom September, »b« für das vom Oktober und »c« für das nebenstehende Rätsel. »b7« meint das Feld mit der Nummer 7 im Oktober-Rätsel, »a24+« den rechten Nachbarn des Feldes Nummer 24 im September-Rätsel und »c45–« den linken Nachbarn des Feldes Nummer 45 im aktuellen Rätsel. Der Lösungstext ist eine Randbemerkung, welche die Wissenschaftler für geraume Zeit beschäftigt hat. Satzzeichen und Wortzwischenräume haben wir weggelassen, damit es nicht zu einfach ist.

b7	c48	a24+	b13+	c67	a30	b9+	c81	a29	b14	c85	a27+	b30+	c2	a24	b15	c32	a12	b40+
c18	a34	b47	c74+	a44	b16+	c15	a41	b65+	c50+	a39	b51	c58+	a10	b6	c33	a43	b52	c34
a38+	b26+	c45–	a51+	b29–	c69	a25	c20	b29	c11	a22	b41	c12+	a45	b59+	c87+	a48	b11	c46
a18	b44	c16+	a19	b27	c59–	a52–	b65	c82	a16+	b21	c68	a28+	b24	c60	a37–			

Senden Sie den Lösungstext mit dem Stichwort »Jubiläumspreisrätsel November« bzw. »Jubiläumspreisrätsel Gesamtlösung« per Post, Fax oder E-Mail an Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg, Fax 06221-9126751, marketing@spektrum.com. Einsendeschluss ist der 20.11.2003 (es gilt das Datum des Poststempels). Der Rechtsweg ist ausgeschlossen.

Die Lösungen der drei Preisrätsel geben wir in der Januar-Ausgabe 2004 bekannt. Die Gewinner werden im Januar benachrichtigt.

Unter allen Einsendern der richtigen Lösung des **November-Rätsels** verlosen wir:

▶ **Kairos – eine Uhr von Chronoswiss**

Die Uhr Kairos im Wert von 3100,– € besitzt ein bis dreißig Meter Tiefe wasserdichtes Goldstahlgehäuse, das aus 19 Teilen von Hand montiert ist. Das Saphirglas im Boden gibt den Blick auf ein hochpräzises Automatikwerk mit kugelgelagertem Rotor frei. Zifferblatt mit Datumsanzeige.

▶ **Ein 8-Zoll-LX10-Schmidt-Cassegrain-f/10-Teleskop von Meade**

Das LX10-Teleskop im Wert von 1695,– € hat eine EMC-Hartvergütung und ein hochwertiges 26-mm-Super-Plössl-Okular der Serie 4000 sowie ein kabelloses, elektronisch geregeltes Nachführsystem.

▶ **Zwei Designleuchten**

Die freischwebende Kugel der 28 cm hohen Design-Leuchte wird von einer magnetischen Kraft gehalten, wobei sich der Lichtstrahl in den Facetten der Kugel bricht und den Raum in ein angenehmes Licht taucht.

▶ **Fünfzig Gyrotwister**

Trainieren Sie Ihre Arme und Handgelenke, indem Sie der durch den Rotor des Gyrotwisters erzeugten Fliehkraft entgegenhalten.

Unter allen Einsendern der richtigen **Gesamtlösung** verlosen wir:

▶ **1. Preis: LX200GPS-8-Zoll-Teleskop von Meade im Wert von 4400,– €**

Das LX200 besticht durch seine automatische Ausrichtung, das integrierte 16-Kanal-GPS-System, eine neue Hauptspiegelzelle und seine UHTC-Vergütung, welche Helligkeit, Kontrast und Auflösung erheblich verbessert. Die neue AutoStar-II-Handbox besitzt einen erweiterten 3,5-MB-Speicher mit einer Datenbasis von über 125 000 Objekten.

▶ **2. Preis: Eine Encyclopædia Britannica im Wert von 1780,– €**

Der Lexikonklassiker schlechthin: 32 Bände in überarbeiteter Neuauflage mit über 65 000 Artikeln, mehr als 24 000 Fotos, Karten und Illustrationen.

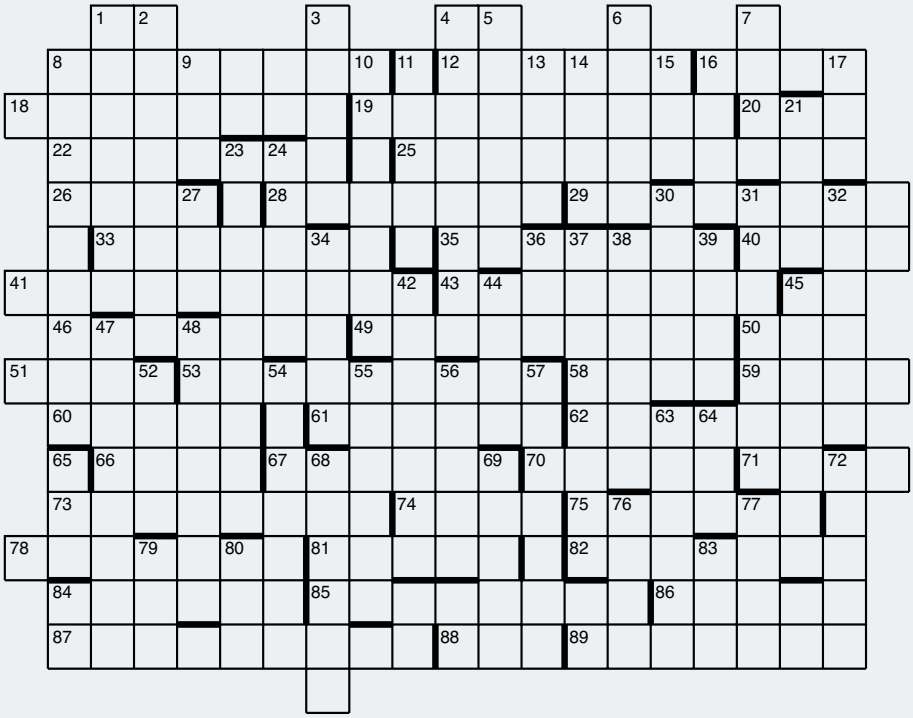
Insgesamt eineinhalb Buchmeter geballtes Wissen!

▶ **3. Preis: Eine Kurzreise nach New York** mit Besuch bei Scientific American (Flug und drei Übernachtungen für zwei Personen).

▶ **und fünfzig weitere Zusatzpreise ...**

Wissenschaftlich um die Ecke gedacht

Von Christoph Pöppe und Elke Reinecke



Waagerecht:

8 je höher sie sind, desto mehr Wurzeln gibt es zu ziehen
12 Zustand erhöhter interner Molekülbewegung
16 *Humulus lupulus* und *Hordeum vulgare* sind seine wesentlichen Bestandteile
18 Maximum mit Erlebnisqualität
19 das Polymer mit dem Flummieffekt
20 ein kleines Fremdatom macht diese organischen Stoffe so träge
22 der Preis für nichtswürdige Forschung
25 seine Stärke ist die Abstraktion
26 erforschte die Kolam-Muster Südindiens (Vorname)
28 den ganz kleinen Unterschied zwischen den 8 waagerecht gibt es nur einmal, vermutete er
29 xenomorph
33 bewies, dass zu jeder Symmetrie ein Erhaltungssatz gehört
35 erzählt uns regelmäßig von Kreiseln und Wasserstrahlen
40 feinkörniges Gemisch aus mineralischen und organischen Komponenten
41 der Trieb, der angeblich doch das Gute schafft
43 beliebtes Objekt der Schlüssellochchirurgie
46 Auslöser für allerlei Reaktionen
49 kümmert sich um kleine graue Zellen
50 dieses Protein bindet sich gern an Intimin
51 Scharnier mit Einschnappmechanik
53 befasst sich mit bewegten Flüssigkeiten
58 ersann einen Test auf Mutagenität
59 Kopiervorlage für die Werkzeuge der Proteinsynthese
60 kleinwüchsig und spät erblühend
61 brennbar, schäumend und tödlich
62 kleinräumig rotierende Luftbewegung
66 hier drehen die ganz Kleinen grenzüberschreitend die Runden
67 wird bei 18 waagerecht auf den Weg gebracht
70 da war doch was in Klammern zum Quadrat
71 Nationale Informationsstelle für Kulturgütererhaltung
73 die kalte Oxidation in den Zellen
74 fördert hier zu Erdteil die Erforschung organischer Moleküle
75 Gen-Gang mit Boss
78 puddingrelevante Orchidee
81 lehrte in Pest, bekämpfte aber eine andere Infektionskrankheit (Vorname)
82 sein Öl schreckt selbst Heuschrecken
84 nach ihr heißen die Kleinen mit dem Frack
85 berauschende Mimose
86 dafür bekommt der Forscher eigens eine ganze Kommission
87 erforschte den Durchfall der ganz Kleinen
88 hyperaktiv bei Asthma
89 lustvolles Nachtschattengewächs

Senkrecht:

1 beliebte Herzinfarkt-Prophylaxe
2 »Die Luft der Freiheit weht« steht auf dem Siegel dieser Universität
3 sein Transformator lässt die Funken sprühen
4 das Wasser hat sein Holz konserviert
5 französischer Nachkomme des Archaeopteryx
6 Ursprung des Kaffees
7 fand ein (keineswegs unanständiges) Diffusionsgesetz
8 erforschte die Thermodynamik fern vom Gleichgewicht
9 Europa schaut »unter sich« in diesem Verein
10 nicht allein lassen! Sonst zerfällt es betamäßig
11 enthielt in der letzten Eiszeit zahlreiche Gletscherstauseen
13 John Herschel, John Whitehead und Stephen Wolfram haben das gemeinsam
14 lässt die Dalmatiner frösteln
15 Transmembranrezeptor mit einer intrazellulären Tyrosin-Kinase-Domäne
16 auf seiner Oberfläche gedeihen andere Mikroben als in seinem Innern
17 Empfänger für feindliche Radarsignale
21 löste die Einstein'schen Feldgleichungen für rotierende Schwarze Löcher
23 das möchte Alice vertraulich an Bob übermitteln
24 in dieser Großfamilie schleichen Schleichen und Doppelschleichen
27 enthält geringe Mengen von Theobromin und Theophyllin
30 damit versucht der Finanzmensch das Risiko einzugrenzen
31 schleimartiges hochmolekulares Polysaccharid
32 ehemaliger wissenschaftlicher Leiter der Hacker Foundation in Beverly Hills
34 entspringt in den tantalischen Bergen
36 das lässt die kleinen Kernlosen gedeihen
37 offiziell eine Teilmenge des Kreuzprodukts zweier Mengen
38 macht eine Figur zu einer vergrößerten Version derselben
39 lehrte seine Zeitgenossen die Coß
42 aufgeschäumter Kautschuk mit hoher Thermoisolationswirkung
44 der Klassiker unter den anionischen Tensiden
45 dieser antike Meister bestimmte die Präzession des Frühlingspunkts
47 dort hat der Cantor-Staub eine offene Teilmenge
48 die erste Singularität
52 der Karpfen schafft nicht die ganze Million pro Jahr, aber eine halbe schon
54 hier lebt der Eisbär
55 nicht darauf kommt es an, erfuhr der Eisbär, sondern auf den Durchmesser, denn der geht mit der zweiten Potenz in das Zylindervolumen ein
56 die Strahlung aus sehr energiereichen Photonen
57 da stockt die rote Flüssigkeit
63 erschloss die Lichtgeschwindigkeit aus Beobachtungen der Jupitermonde
64 da zittern die Atomkerne im Gleichtakt
65 nach der herrschenden Meinung lebte sie in Afrika
68 ist in der asiatischen Kaiserkrone enthalten
69 verhindert den Erstickungstod im Labor
72 er kannte die meisten Differenzialgleichungen persönlich
76 Vater und Sohn bestimmten den Inhalt unseres Mutterblattes
77 dort liegt der Standort Manoa der University of Hawaii
79 Elektriker aller Länder, vereinigt euch
80 fand die Theorie der kontinuierlichen Transformationsgruppen
83 wer seine Reagenzgläser nicht selber spülen will, braucht sie

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet »Mathematik« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

GEOMETRIE

Ein Mittel gegen nachbarliche Neugier

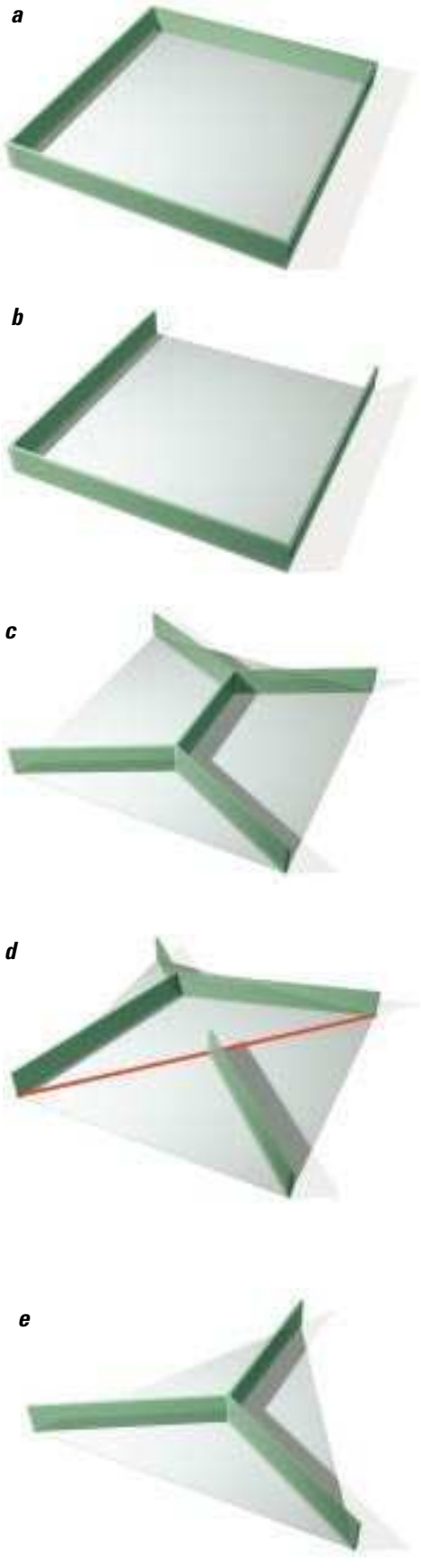
Wer den Durchblick durch sein Grundstück wirksam und preiswert verhindern will, gerät an ein bislang ungelöstes Problem der Geometrie.

Von Ian Stewart

Die kombinatorische Geometrie bietet eine Fülle leicht zu erklärender, gleichwohl noch ungelöster Probleme folgenden Typs: Finde eine Anordnung von Geraden, Kurven oder anderen geometrischen Objekten, die eine bestimmte Anforderung auf die sparsamste Weise erfüllen. So zum Beispiel das Problem vom blickdichten Quadrat (*opaque square problem*), das ich – mitsamt den hier vorgestellten Lösungen – Bernd Kawohl verdanke, einem Mathematikprofessor an der Universität zu Köln.

Stellen Sie sich den Besitzer eines quadratischen Grundstücks vor, der ein etwas merkwürdiges Ziel verfolgt: Er selbst ist nicht unbedingt unkommunikativ, aber er möchte unter allen Umständen verhindern, dass zwei seiner Nachbarn über sein Grundstück hinweg miteinander Blickkontakt aufnehmen. Also stellt er einen Sichtschutzzaun auf sein Gelände, und es macht ihm überhaupt nichts aus, dadurch seine eigene Bewegungsfreiheit einzuschränken. Aber geizig ist er, wie bei solchen Problemen üblich. Gesucht ist also nach dem kürzesten Zaun, der das Quadrat blickdicht macht. Er darf beliebig kompliziert sein, krummlinig oder verzweigt, und auch aus mehreren getrennten Teilstücken bestehen.

Die nahe liegendste Lösung besteht darin, das ganze Gelände rundum einzuzäunen (Bild links, *a*). Sie ist allerdings sehr aufwendig: Vier Kilometer Zaun sind erforderlich, wenn das Quadrat eine Seitenlänge von einem Kilometer hat. Schon nach kurzem Nachdenken stellt sich heraus, dass man eine der vier Zaunseiten schadlos weglassen kann, was die Gesamtlänge immerhin auf drei Kilometer vermindert (*b*). Das ist bereits der kürzestmögliche Zaun, wenn wir darauf bestehen, dass er aus einem einzigen, unverzweigten Stück besteht. Warum? Weil in jeder Ecke des Quadrats ein Stück Zaun enden muss, sonst könnten die Nachbarn doch über einen kleinen Zipfel des Grundstücks hinwegschauen. Und die kürzeste – gerade oder gekrümmte – Linie, die alle vier Ecken enthält, ist der Dreiseitenzaun.



Ein blickdichter Zaun steht jeder (geraden) Sichtlinie, die durch eine gegebene Figur verläuft, im Wege. Wenn die Figur ein Quadrat ist, sind der Rundumzaun (*a*) und auch noch der dreiseitige Zaun (*b*) blickdicht; aber ein Steinerbaum-Zaun (*c*) und ein zweiteiliger Zaun (*d*) sind bei gleicher Wirkung kürzer. Für das gleichseitige Dreieck ist der kürzeste blickdichte Zaun ebenfalls ein Steinerbaum (*e*). Für das regelmäßige Fünfeck (*f*) und Sechseck (*g*) sind die besten bekannten Lösungen dreiteilig.

GRAFIKEN: BRYAN CHRISTIE

Sowie der Zaun allerdings mehr als eine Kurve enthalten darf, kann man an der Länge noch sparen. Der Zaun in Bild *c* ist $1+\sqrt{3}$ (ungefähr 2,732) Kilometer lang. Es handelt sich um einen so genannten Steinerbaum: das kürzeste Verbindungsnetz zwischen den vier Eckpunkten (Spektrum der Wissenschaft 4/1995, S. 10). Alle seine Teile treffen sich unter Winkeln von 120 Grad, sonst wäre der Baum nicht minimal; denn einen Baum mit anderen Winkeln könnte man so deformieren, dass er insgesamt kürzer wird.

Einen kürzeren Zaun als den Steinerbaum gibt es nicht, wenn der Zaun zusammenhängend sein soll. Wenn er allerdings aus mehreren Stücken bestehen darf, kommt man mit 2,639 Kilometern Gesamtlänge aus (*d*). Die drei Strecken in der oberen Bildhälfte treffen sich wieder unter 120 Grad. Allgemein glaubt man, dass dies der kürzeste blickdichte Zaun für ein Quadrat ist – aber bewiesen hat das noch niemand.

Es ist noch nicht einmal sicher, ob es überhaupt einen kürzesten blickdichten Zaun gibt. Vielleicht ist es ja möglich, den Zaun immer weiter zu verkürzen, indem man ihn immer komplizierter macht. Man kann zwar beweisen, dass es einen Zaun minimaler Länge geben muss, wenn die Anzahl seiner Teilstücke vorgeschrieben ist; dazu muss man diesen Zaun nicht unbedingt konstruieren können. Aber es ist nicht bekannt, ob die Länge dieses minimalen Zaunes mit zunehmender Stückzahl immer weiter abnimmt oder ob gar ein Zaun aus unendlich vielen Komponenten jeden endlichteiligen unterbieten würde. Diese Möglichkeiten scheinen zwar sehr unwahrscheinlich, sind aber bislang nicht ausgeschlossen worden.

Das optimale Durchblickhindernis

Unter der Bedingung, dass es höchstens zwei Teilstücke sein dürfen, hat Kawohl einen sehr schönen Beweis für die Optimalität der Lösung *d* gegeben. Er zeigt zunächst, dass eine Komponente drei Ecken des Quadrats enthalten muss und die andere die vierte. Wenn nämlich die beiden Teilzäune die Ecken gerecht unter sich aufteilen würden – einer die linken, der andere die rechten –, dann müssten beide irgendwie so in die Mitte ragen, dass auch dort der Blick versperrt wird. Wie man mit einigen weiteren Argumenten zeigen kann, würde dadurch die Gesamtlänge größer, als wenn man einen Punkt in der Mitte mit allen vier Ecken verbinden würde, und damit sicher nicht mehr optimal. Zweitens muss die Komponente, die für die drei Ecken verantwortlich ist, der Steinerbaum zu diesen drei Punkten sein. Die konvexe Hülle dieses Gebildes – das heißt die kleinste konvexe Figur, in der es enthalten ist – ist das Dreieck aus den drei Eckpunkten, sprich von dem diagonal zerschnittenen Quadrat die linke obere Hälfte. Die zweite Komponente des Zauns ist dann die kürzeste Linie, welche die vierte Quadratecke mit diesem Dreieck verbindet: das Stück Diagonale von der Ecke bis zum Mittelpunkt des Quadrats.

Was weiß man über anders geformte Grundstücke? Für ein gleichseitiges Dreieck ist der kürzeste blickdichte Zaun der Steinerbaum zu den drei Ecken (*e*). Für das regelmäßige Fünfeck ist die beste bekannte Lösung dreiteilig (*f*): ein Steinerbaum für ein Dreieck aus drei benachbarten Ecken des Fünfecks, ein Stück Zaun, das die vierte Ecke an das Dreieck anbindet, und ein entsprechendes Stück für die fünfte Ecke. ▷

h

i

Für ein regelmäßiges Vieleck mit zahlreichen Seiten hat ein blickdichter Zaun viele Komponenten (*h*). Seine Gesamtlänge nähert sich der eines optimalen Zauns für den Kreis (*i*).

▷ Das regelmäßige Sechseck (*g*) hat von sich aus schon Winkel von 120 Grad, deswegen besteht der Steinerbaum für vier benachbarte Ecken aus den drei dazwischen liegenden Seiten. Die beiden restlichen Eckpunkte werden wie beim Fünfeck angeschlossen: Ein Zaunstück führt von der jeweiligen Ecke auf kürzestem Wege zu der konvexen Hülle des bis dahin konstruierten Zauns. Sowohl für das Fünfeck wie für das Sechseck scheint diese Konstruktion optimal zu sein.

Vieleckszäune

Das Verfahren ist verallgemeinerbar auf Vielecke mit beliebig großer, gerader Seitenzahl: Man ziehe eine Gerade durch zwei gegenüberliegende Ecken und ziehe zunächst einen Zaun entlang sämtlicher Seiten, die links von diesem Durchmesser liegen (*h*). Die konvexe Hülle dieser ersten Zaunkomponente ist die linke Hälfte des Vielecks. Von der nächsten freien Ecke fälle man das Lot in Form eines Zaunstücks auf die konvexe Hülle, wodurch sich Letztere wieder etwas vergrößert, verfahre mit der nächsten Ecke ebenso, und so weiter.

Bei sehr großer Seitenzahl nähert sich das Vieleck allmählich einem Kreis. Welches ist der kürzeste Zaun, der einen Kreis blickdicht macht? Das Problem ist deutlich schwerer als bei eckigen Grundstücken, denn es gilt selbst jenen Nachbarn, die nur ein ganz kurzes Stück am Rand des Kreises über das Grundstück hinwegpeilen, den Spaß zu verderben. Muss man deswegen den ganzen Kreis einzäunen, mit stolzen $2\pi = 6{,}28$ Kilometer Zaunlänge, wenn der Kreis den Radius 1 Kilometer hat?

Es geht besser, wenn der Zaun außerhalb des Kreises liegen darf. Man setze wie beim vielseitigen Vieleck einen Zaun auf die Hälfte des Umfangs und verlängere ihn beiderseits in Richtung der Tangente um jeweils einen Kilometer (*i*). Der so entstehende U-förmige Zaun macht den Kreis blickdicht und hat eine Länge von $\pi+2 = 5{,}142$ Kilometer. Und wenn man darauf besteht, dass er aus einem Stück und unverzweigt ist, geht es nicht kürzer; so viel ist beweisbar.

Nun werden die missgünstigen Nachbarn unseren Eigenbrötler wohl kaum einen Zaun auf ihre Grundstücke setzen lassen. Aber in einer anderen Einkleidung macht das Problem mehr Sinn. Unter der Erde liegt ein geradliniges Rohr, von dem man nur weiß, dass es in höchstens einem Kilometer Entfernung von einem bestimmten Punkt verläuft. Das Rohr trifft also einen Kreis mit einem Kilometer Radius um diesen Punkt. Also sucht man einen möglichst kurzen Graben, der jede Gerade trifft, die durch den Kreis verläuft; aber der Graben muss nicht unbedingt auf den Kreis beschränkt sein. Das ist die Geschichte vom großen Raub im Abwasserkanal (Spektrum der Wissenschaft 2/1996, S. 10). Und was dem einen sein Graben, das ist dem anderen sein Zaun.

Und wenn es nun doch ein Zaun sein soll, der gänzlich auf dem kreisförmigen Grundstück steht? Dann kommt man trotzdem mit einer Gesamtlänge von $\pi+2$ Kilometern aus. Kawohl hat das bewiesen, indem er die Gesamtlänge des Zauns für das Vieleck *h* im Grenzwert unendlich vieler Ecken berechnete. Das Ergebnis ist $\pi+2$.

Aber wie kann man sich den »Grenzwert«-Zaun vorstellen? Nur mühsam. Die Westhälfte ist einfach ein Halbkreiszaun. Aber die Osthälfte! Sie besteht aus unendlich vielen Komponenten, die jede mit der rechten Seite – von innen aus gesehen – auf dem Kreisumfang stehen und mit der linken Seite in den Kreis hineinragen, aber nur ein unendlich kurzes Stück, denn sie sind unendlich schmal. Der Kreisumfang ist dicht mit rechten Zaunpfosten besetzt: Jeder Versuch eines Durchblicks findet in beliebig kleiner Entfernung ein Hindernis.

Auf diese Weise deckt ein unendlich fragmentierter Zaun der Gesamtlänge 2 einen Halbkreis der Länge π zu. Das kann doch irgendwie nicht stimmen? Doch. Man kann ein Fenster mit einer Jalousie, die nur die halbe Fensterbreite hat, versperren, indem man sie halbiert, die eine Hälfte in die linke Hälfte der linken Fensterhälfte hängt und die andere Hälfte in die linke Hälfte der rechten Fensterhälfte. Mit beiden Fensterhälften verfährt man dann genauso, mit den dadurch entstehenden Fenstervierteln ebenfalls, und so weiter. Was wie Hokuspokus aussieht, lässt sich mit einem theoretischen Werkzeug namens Hausdorff-Topologie sauber formlieren und beweisen.

Was gilt für andere Grundstücksformen wie unregelmäßige Vielecke (konvex oder nicht), Ellipsen und Halbkreise? Wie steht es um dasselbe Problem in drei Dimensionen? Welche Flächen muss man – möglichst sparsam – in einen hohlen Würfel oder eine solche Kugel einfügen, damit kein Licht ihr Inneres durchdringt? Hier gibt es noch viel zu tun. ◁

Ian Stewart ist Professor für Mathematik an der Universität von Warwick in Coventry (England).

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Some Nonconvex Shape Optimization Problems. Von Bernd Kawohl in: Optimal Shape Design. Von Arigo Cellina und Antonio Ornelas (Hg.). Springer Lecture Notes in Mathematics, Band 1740. Springer, Heidelberg 2000; S. 76. Download unter: www.mi.uni-koeln.de/mi/Forschung/Kawohl/kawohl/springercime.ps

From Mumford-Shah to Perona-Malik in Image Processing. Von Bernd Kawohl. Erscheint in: Mathematical Methods in the Applied Sciences. Download unter: www.mi.uni-koeln.de/mi/Forschung/Kawohl/kawohl/KawMStoPM.pdf

Symmetry or Not? Von Bernd Kawohl in: The Mathematical Intelligencer, Bd. 20, Heft 2, 1998, S. 16.

The Opaque Cube Problem. Von Kenneth A. Brakke in: American Mathematical Monthly, Bd. 99, Heft 9, 1992, S. 866. Download unter: www.susqu.edu/facstaff/b/brakke/papers/opaque.ps

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Herausforderung Mars

Gleich drei Marssonden erreichen in den nächsten Wochen ihr Ziel. Vom Orbit aus und mit Landerobotern soll nun endlich die Frage geklärt werden, ob unser roter Nachbarplanet einst über große Wassermengen verfügte.

Die Sonde Mars Express erreicht Ende Dezember den Roten Planeten

NASA

WEITERE THEMEN IM DEZEMBER

Kranke Retortenkinder – Bilanz nach 25 Jahren

Nach einer künstlichen Befruchtung weisen Kinder öfter als sonst Schäden auf. Haben Mediziner die neuen Methoden zu früh eingesetzt?

Bedrohte Seepferdchen

Erst jetzt schränkt das Washingtoner Artenschutzgesetz den millionenfachen Fang von Seepferdchen im Jahr ein.

IFA - BILDERTEAM

JOHN GURCHE

Unsere europäischen Affen-Vorfahren

Die menschliche Evolution erfolgte zwar in Afrika. Doch unsere direkten äffischen Vorfahren hatten europäische Menschenaffen als Urahnen.

THOMAS WAGNER

Die extreme Treibhauswelt der Kreidezeit

Schwarze Sedimente in Marokko – hier am Fuß der Klippen – enthüllen ein Klimadrama vor 94 Millionen Jahren. Vulkanisches Kohlendioxid hatte die Erde zur Sauna gemacht, und in der Hitze wurden die Ozeane weithin zu stinkenden Kloaken.